

Université de Montréal

Évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain du Québec aux variabilités et changements climatiques : Les cas de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est

Par

Kénel Délusca

Département de géographie  
Faculté des arts et sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Philosophiae Doctor (Ph.D.)  
en géographie

février, 2010

© Kénel Délusca, 2010

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain du Québec aux variabilités et changements climatiques : Les cas de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est

présentée par :  
Kénel Délusca

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Pierre André  
Présidente-rapporteur

Bhawan Singh  
Directeur de recherche

Christopher R. Bryant  
Co-directeur

Gaétan Bourgeois  
Membre du jury

Chandra A. Madramootoo  
Examineur externe

Marc Amyot  
Représentant du doyen de la FES

## RÉSUMÉ

Réalisées aux échelles internationales et nationales, les études de vulnérabilité aux changements et à la variabilité climatiques sont peu pertinentes dans un processus de prise de décisions à des échelles géographiques plus petites qui représentent les lieux d'implantation des stratégies de réponses envisagées. Les études de vulnérabilité aux changements et à la variabilité climatiques à des échelles géographiques relativement petites dans le secteur agricole sont généralement rares, voire inexistantes au Canada, notamment au Québec. Dans le souci de combler ce vide et de favoriser un processus décisionnel plus éclairé à l'échelle de la ferme, cette étude cherchait principalement à dresser un portrait de l'évolution de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est aux changements et à la variabilité climatiques dans un contexte de multiples sources de pression.

Une méthodologie générale constituée d'une évaluation de la vulnérabilité globale à partir d'une combinaison de profils de vulnérabilité aux conditions climatiques et socio-économiques a été adoptée. Pour la période de référence (1985-2005), les profils de vulnérabilité ont été dressés à l'aide d'analyses des coefficients de variation<sup>1</sup> des séries temporelles de rendements et de superficies en maïs-grain. Au moyen de méthodes ethnographiques associées à une technique d'analyse multicritère, le Processus d'analyse hiérarchique (PAH), des scénarios d'indicateurs de capacité adaptative<sup>2</sup> du secteur agricole susmentionné ont été développés pour la période de référence. Ceux-ci ont ensuite servi de point de départ dans l'élaboration des indicateurs de capacité de réponses des producteurs agricoles pour la période future 2010-2039.

---

<sup>1</sup> Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la vulnérabilité des producteurs agricole est grande.

<sup>2</sup> Plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus la capacité adaptative des producteurs agricoles est grande.

Pour celle-ci, les deux profils de vulnérabilité sont issus d'une simplification du cadre théorique de « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC) relatif aux principales composantes du concept de vulnérabilité. Pour la dimension « sensibilité » du secteur des fermes productrices de maïs-grain des deux régions agricoles aux conditions climatiques, une série de données de rendements a été simulée pour la période future. Ces simulations ont été réalisées à l'aide d'un couplage de cinq scénarios climatiques et du modèle de culture CERES-Maize de « Decision Support System for Agrotechnology Transfer » (DSSAT), version 4.0.2.0. En ce qui concerne l'évaluation de la « capacité adaptative » au cours de la période future, la construction des scénarios d'indicateurs de cette composante a été effectuée selon l'influence potentielle des grandes orientations économiques et environnementales considérées dans l'élaboration des lignes directrices des deux familles d'émissions de gaz à effet de serre (GES) A2 et A1B.

L'application de la démarche méthodologique préalablement mentionnée a conduit aux principaux résultats suivants. Au cours de la période de référence, la région agricole du Lac-St-Jean-Est semblait être plus vulnérable aux conditions climatiques que celle de Montérégie-Ouest. En effet, le coefficient de variation des rendements du maïs-grain pour la région du Lac-St-Jean-Est était évalué à 0,35; tandis que celui pour la région de Montérégie-Ouest n'était que de 0,23. Toutefois, par rapport aux conditions socio-économiques, la région de Montérégie-Ouest affichait une vulnérabilité plus élevée que celle du Lac-St-Jean-Est. Les valeurs des coefficients de variation pour les superficies en maïs-grain au cours de la période de référence pour la Montérégie-Ouest et le Lac-St-Jean-Est étaient de 0,66 et 0,48, respectivement.

Au cours de la période future 2010-2039, la région du Lac-St-Jean-Est serait, dans l'ensemble, toujours plus vulnérable aux conditions climatiques que celle de Montérégie-Ouest. Les valeurs moyennes des coefficients de variation pour les rendements agricoles

anticipés fluctuent entre 0,21 et 0,25 pour la région de Montérégie-Ouest et entre 0,31 et 0,50 pour la région du Lac-St-Jean-Est. Néanmoins, en matière de vulnérabilité future aux conditions socio-économiques, la position relative des deux régions serait fonction du scénario de capacité adaptative considéré. Avec les orientations économiques et environnementales considérées dans l'élaboration des lignes directrices de la famille d'émission de GES A2, les indicateurs de capacité adaptative du secteur à l'étude seraient respectivement de 0,13 et 0,08 pour la Montérégie-Ouest et le Lac-St-Jean-Est. D'autre part, en considérant les lignes directrices de la famille d'émission de GES A1B, la région agricole du Lac-St-Jean-Est aurait une capacité adaptative légèrement supérieure (0,07) à celle de la Montérégie-Ouest (0,06). De façon générale, au cours de la période future, la région du Lac-St-Jean-Est devrait posséder une vulnérabilité globale plus élevée que la région de Montérégie-Ouest. Cette situation s'expliquerait principalement par une plus grande vulnérabilité de la région du Lac-St-Jean-Est aux conditions climatiques.

Les résultats de cette étude doivent être appréciés dans le contexte des postulats considérés, de la méthodologie suivie et des spécificités des deux régions agricoles examinées. Essentiellement, avec l'adoption d'une démarche méthodologique simple, cette étude a révélé les caractéristiques « dynamique et relative » du concept de vulnérabilité, l'importance de l'échelle géographique et de la prise en compte d'autres sources de pression et surtout de la considération d'une approche contraire à celle du « agriculteur réfractaire aux changements » dans les travaux d'évaluation de ce concept dans le secteur agricole. Finalement, elle a aussi présenté plusieurs pistes de recherche susceptibles de contribuer à une meilleure évaluation de la vulnérabilité des agriculteurs aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression.

### **MOTS-CLÉS**

Changements climatiques, vulnérabilité, agriculture, DSSAT, Processus d'analyse hiérarchique, capacité adaptative

## ABSTRACT

The undertaking of vulnerability studies in relation to climatic change and vulnerability at the international and national levels renders them less relevant to a decision-making process at smaller spatial scales where specific response strategies are implemented. Vulnerability studies to climatic change and variability at relatively small geographic scales within the agriculture sector are rare in general, and even nonexistent in Canada, including Quebec. In order to fill in this gap and to contribute to a better decision-making process at the farm level, this study aimed at presenting a description and analysis of the evolution of grain corn growers' vulnerability to climatic change and variability and other stressors within the Montérégie-Ouest and Lac-St-Jean-Est regions.

A general methodology consisting of an assessment of farmers' overall vulnerability by combining vulnerability profiles to climate and socio-economic conditions has been considered. For the reference period (1985-2005), vulnerability profiles were constructed by analyzing the variation coefficients<sup>3</sup> of grain corn yields and crop area data. By means of ethnographic methods associated with a multicriteria analysis technique, the Analytic Hierarchy Process (AHP), adaptive capacity indices<sup>4</sup> of the agriculture sector have been elaborated upon for the reference period. These indices have then been used as a starting point in the construction of scenario indices of future adaptive capacity of farmers for the future period 2010-2039.

For this future period (2010-2039), vulnerability profiles for both regions have been created using a simplified version of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) conceptual framework on the components of vulnerability. For the « sensitivity » component of grain corn growers to climate conditions within the selected agricultural regions, a set of

---

<sup>3</sup> The higher the value for the coefficient of variation, the higher the farmers' vulnerability.

<sup>4</sup> The higher the value of the index, the higher the farmers' adaptive capacity.

grain corn yields has been simulated using five climate scenarios coupled with CERES-Maize, one of the crop models embedded in the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT 4.0.2.0 version) software. In regards to the evaluation of the « adaptive capacity » for the future period (2010-2039), the elaboration of indices for this component has been undertaken by considering the potential influence of the main economic and environmental drivers used in the development of the storylines for two greenhouse gas (GHG) emission scenarios families, namely the A2 and A1B families.

The application of the methodological approach mentioned above produced the following key results. For the reference period, the Lac-St-Jean-Est region appeared to be more vulnerable to climate conditions than Montérégie-Ouest region. The coefficient of variation for grain corn yields within the Lac-St-Jean-Est region was evaluated to be 0,35, while the value for the Montérégie-Ouest region was only 0,23. However, with respect to the socio-economic conditions, the Montérégie-Ouest region showed greater vulnerability than the Lac-St-Jean-Est region. The values of the coefficient of variation for the areas under grain corn during the reference period (1985-2005) within Montérégie-Ouest and Lac-St-Jean-Est were 0,66 and 0,48 respectively.

For the future period (2010-2039), the Lac-St-Jean-Est region, once again, would seem to be more vulnerable to climate conditions than the Montérégie-Ouest region. The average values of the coefficient of variation for the simulated grain corn yields fluctuate between 0,21 and 0,25 for the Montérégie-Ouest region and between 0,31 and 0,50 for Lac-St-St-Jean-Est region. However, from a socio-economic perspective, the relative vulnerability status of both regions would seem to vary according to the scenario of adaptive capacity considered. With the economic and environmental drivers considered in the storylines of the A2 GHG emissions scenario family, the adaptive capacity indices for the sector under study would be 0,13 and 0,08 for Montérégie-Ouest and Lac-St-Jean-Est, respectively. On the other

hand, by considering the economic and environmental drivers considered for the A1B GHG emissions scenario family, the Lac-St-Jean-Est agricultural region would appear to have an adaptive capacity slightly higher (0,07) than that of the Montérégie-Ouest region (0,06). In general, for the future period, the Lac-St-Jean-Est region would appear to have greater overall vulnerability than the Montérégie-Ouest. This situation can be explained mainly by a greater vulnerability of Lac-St-Jean-Est region to climate conditions.

The results of this study have to be interpreted within the context of the assumptions considered, the methodology used, and the characteristics of the two regions under study. In general, using a simple methodological approach, this study revealed the « dynamic and relative » characteristics of the vulnerability concept, the importance of spatial scale and consideration of multiple stressors and the integration of an approach different to the commonly used « dumb-farmer<sup>5</sup> » approach for the evaluation of this concept of vulnerability within the agriculture sector. Finally, this study has also identified some new research pathways likely to contribute to a better evaluation of farmers' vulnerability to climate change in the context of multiple stressors.

## **KEY WORDS**

Climate change, vulnerability, agriculture, DSSAT, Analytic Hierarchy Process, adaptive capacity.

---

<sup>5</sup> This term refers to the fact that, a majority of researchers in their climate change modeling domain have tended to consider only climate change as drivers of impacts and ignore any management adjustment by the farmers.



## TABLE DES MATIÈRES

|   |                    |
|---|--------------------|
| <b>RÉSUMÉ</b>   | <b><i>i</i></b>    |
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b>   | <b><i>vii</i></b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b>   | <b><i>ix</i></b>   |
| <b>LISTE DES FIGURES</b>  | <b><i>xiii</i></b> |
| <b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS</b>   | <b><i>xvii</i></b> |
| <b>REMERCIEMENTS</b>  | <b><i>xx</i></b>   |
| <b>INTRODUCTION</b>   | <b><i>1</i></b>    |
| <b>Chapitre 1. PORTRAIT ET PROBLÉMATIQUE DES FERMES PRODUCTRICES DE MAÏS-GRAIN DE MONTEREGIE-UEST ET DU LAC-ST-JEAN-EST</b> | <b><i>6</i></b>    |
| 1.1 Portrait des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest  | <i>6</i>           |
| 1.2 Portrait des fermes productrices de maïs-grain au Lac-St-Jean-Est   | <i>9</i>           |
| 1.3 Problématique des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est                           | <i>12</i>          |
| <b>Chapitre 2. DESCRIPTION DES ZONES D'ÉTUDE</b>  | <b><i>15</i></b>   |
| 2.1 Région de Montérégie-Ouest  | <i>15</i>          |
| 2.2 Région du Lac-St-Jean-Est   | <i>26</i>          |
| <b>Chapitre 3. SYNTHÈSE DU CONCEPT DE VULNERABILITE</b>   | <b><i>29</i></b>   |
| 3.1 Origines des études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques                                       | <i>29</i>          |
| 3.1.1 Risques et catastrophes naturels  | <i>29</i>          |
| 3.1.2 Économie et écologie politiques   | <i>38</i>          |
| 3.3.3 Résilience écologique   | <i>39</i>          |
| 3.2 Vulnérabilité : définition et composantes   | <i>40</i>          |
| 3.3 Quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques   | <i>44</i>          |
| <b>Chapitre 4. MÉTHODOLOGIE</b>   | <b><i>55</i></b>   |
| 4.1 Approche méthodologique d'évaluation de vulnérabilité pour la période de référence                                      | <i>56</i>          |
| 4.2 Évaluation de la capacité adaptative de référence des fermes  | <i>61</i>          |

|                    |   |            |
|--------------------|---|------------|
| 4.3                | Scénarios de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain pour la période future                                 | 66         |
| 4.4                | Approche méthodologique d'évaluation de la vulnérabilité pour la période future   | 68         |
| <b>Chapitre 5.</b> | <b>DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES</b>  | <b>85</b>  |
| 5.1                | Données pour la période de référence  | 85         |
| 5.2                | Données pour la période future  | 90         |
| <b>Chapitre 6.</b> | <b>DESCRIPTION DU MODÈLE CERES-MAIZE DE DSSAT ET DE LA TECHNIQUE DU PROCESSUS D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE</b>                      | <b>94</b>  |
| 6.1                | Description du modèle CERES-Maize de DSSAT  | 94         |
| 6.1.1              | Développement de la culture du maïs-grain   | 97         |
| 6.1.2              | Production de biomasse végétale   | 99         |
| 6.1.3              | Effet fertilisant du CO <sub>2</sub>  | 100        |
| 6.1.4              | Principales différences entre CERES 4.0.2.0 et les versions précédentes   | 102        |
| <b>Chapitre 7.</b> | <b>RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>  | <b>110</b> |
| 7.1                | Vulnérabilité aux conditions climatiques pour la période de référence   | 112        |
| 7.2                | Vulnérabilité aux facteurs socio-économiques pour la période de référence   | 124        |
| 7.3                | Explication des variabilités au niveau des rendements et des superficies en maïs-grain pour les trois municipalités retenues  | 137        |
| 7.4                | Capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain pour la période de référence  | 143        |
| 7.5                | Scénarios d'indicateurs de capacité adaptative et de CV des superficies en maïs-grain au cours de la période future 2010-2039 | 157        |
| 7.6                | Vulnérabilité pour la période future 2010-2039  | 164        |
| <b>Chapitre 8.</b> | <b>REGARD CRITIQUE SUR LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE ET LES RÉSULTATS OBTENUS</b>  | <b>196</b> |
|                    | <b>CONCLUSION</b>   | <b>201</b> |
|                    | <b>BIBLIOGRAPHIE</b>  | <b>209</b> |
|                    | <b>ANNEXES</b>  | <b>xxi</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1. Superficies en maïs-grain et superficies totales en production végétale pour les MRC de la région de Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b> | 8  |
| <b>Tableau 2. Nombre de fermes productrices de maïs-grain dans les MRC de la région de Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b>                             | 9  |
| <b>Tableau 3. Fermes productrices de maïs-grain dans les municipalités de la région agricole du Lac-St-Jean-Est au cours de l'année 2006</b>                             | 11 |
| <b>Tableau 4. Liste et superficie des municipalités faisant partie des 6 MRC de la Montérégie-Ouest</b>  | 17 |
| <b>Tableau 5. Nombre de SRU pour les différents MRC de la Montérégie-Ouest</b>   | 18 |
| <b>Tableau 6. Répartition et évolution des fermes agricoles par MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b>  | 20 |
| <b>Tableau 7. Répartition et évolution des superficies des fermes agricoles pour les MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b>                     | 21 |
| <b>Tableau 8. Évolution des fermes individuelles à propriété unique en Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b>   | 23 |
| <b>Tableau 9. Évolution des montants dépensés par les fermes agricoles selon le type de main-d'œuvre en Montérégie-Ouest au cours des années 2000 et 2005</b>            | 24 |
| <b>Tableau 10. Évolution du capital agricole par MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006</b>   | 25 |
| <b>Tableau 11. Approches utilisées dans les études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture</b>   | 31 |
| <b>Tableau 12. Principaux cadres conceptuels utilisés dans la quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques</b>                        | 46 |
| <b>Tableau 13. Critères supplémentaires de différenciation des études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques</b>                                  | 49 |
| <b>Tableau 14. Caractéristiques des scénarios climatiques utilisés lors des simulations des rendements du maïs-grain</b>   | 73 |
| <b>Tableau 15. Séries de données climatiques historiques utilisées dans les processus de calibration et de validation du modèle de culture</b>                           | 87 |
| <b>Tableau 16. Longueur des séries de données de rendements agricoles utilisées pour les trois municipalités retenues</b>  | 88 |
| <b>Tableau 17. Paramètres pédologiques considérés dans les simulations des rendements du maïs-grain</b>  | 89 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tableau 18 . Valeurs des coefficients génétiques des cultivars plus performants -----</b>   | <b>92</b>  |
| <b>Tableau 19 . Liste des stades phénologiques considérés dans CERES-Maize-----</b>  | <b>97</b>  |
| <b>Tableau 20. Échelle comparative des jugements utilisée dans le PAH -----</b>  | <b>108</b> |
| <b>Tableau 21. Signification statistique des différences de moyennes de rendement du maïs-grain pour les MRC de la Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>                            | <b>116</b> |
| <b>Tableau 22. Distribution des municipalités de Montérégie-Ouest selon les classes de vulnérabilité aux conditions climatiques pour la période de référence, 1985-2005-----</b>                                       | <b>119</b> |
| <b>Tableau 23. Comparaison des rendements et des CV moyens des rendements de maïs-grain entre les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période de référence, 1985-2005-----</b>                       | <b>121</b> |
| <b>Tableau 24. Signification statistique des différences de moyennes de CV de rendement du maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>   | <b>122</b> |
| <b>Tableau 25. Signification statistique des différences de superficies moyennes en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>          | <b>128</b> |
| <b>Tableau 26. Distribution des municipalités de Montérégie-Ouest selon les niveaux de vulnérabilité aux conditions socio-économiques au cours de la période de référence, 1985-2005 -----</b>                         | <b>131</b> |
| <b>Tableau 27. Comparaison des superficies moyennes et de CV moyens des superficies en maïs-grain entre les MRC de la région de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>               | <b>134</b> |
| <b>Tableau 28. Signification statistique des différences de moyennes de CV de superficies en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b> | <b>135</b> |
| <b>Tableau 29. Degré de relation entre les UTM et les rendements de maïs-grain des municipalités de Sainte-Martine, Saint-Sébastien et Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, 1985-2005 -----</b>                               | <b>139</b> |
| <b>Tableau 30. Facteurs considérés dans le processus de décisions relatives à l'allocation des cultures sur les fermes agricoles des municipalités à l'étude en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est -----</b>       | <b>142</b> |
| <b>Tableau 31. Pondération des déterminants de capacité adaptative future des fermes productrices de maïs-grain dans les deux municipalités de la Montérégie-Ouest (Sainte-Martine et Saint-Sébastien) -----</b>       | <b>160</b> |
| <b>Tableau 32. Pondération des déterminants de capacité adaptative future des fermes productrices de maïs-grain au Lac-St-Jean-Est (Lac-à-la-Croix/Métabetchouan)-----</b>   | <b>160</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tableau 33. Indicateurs de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain dans les trois municipalités à l'étude au cours de la période future (2010-2039)</b>   | <b>161</b> |
| <b>Tableau 34. CV des superficies en maïs-grain pour les trois municipalités à l'étude au cours de la période future (2010-2039)</b>   | <b>162</b> |
| <b>Tableau 35. Coefficients génétiques des cultivars calibrés et validés pour la période de référence (1985-2005) dans les trois municipalités à l'étude</b>   | <b>165</b> |
| <b>Tableau 36. Résultats du processus de validation des cultivars de maïs-grain au cours de la période de référence (1985-2005) pour les trois municipalités à l'étude</b>   | <b>166</b> |
| <b>Tableau 37. Changement relatif (en %) des potentiels de rendements du maïs-grain pour les trois municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039</b>  | <b>170</b> |
| <b>Tableau 38. Changement relatif (en %) des rendements limités par l'eau pour le maïs-grain dans les trois municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039</b>   | <b>172</b> |
| <b>Tableau 39. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Sainte-Martine</b>   | <b>173</b> |
| <b>Tableau 40. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Sainte-Martine</b>  | <b>174</b> |
| <b>Tableau 41. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Saint-Sébastien</b>  | <b>176</b> |
| <b>Tableau 42. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Saint-Sébastien</b>   | <b>177</b> |
| <b>Tableau 43. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan</b>   | <b>179</b> |
| <b>Tableau 44. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan</b>  | <b>180</b> |
| <b>Tableau 45. Impacts des changements climatiques sur les températures maximales et minimales pendant la phase de remplissage des grains en considérant les cultivars de référence pour les trois municipalités à l'étude</b> | <b>181</b> |
| <b>Tableau 46. Impacts des changements climatiques sur les températures maximales et minimales pendant la phase de remplissage des grains en considérant les cultivars améliorés pour les trois municipalités à l'étude</b>    | <b>182</b> |
| <b>Tableau 47. Impacts des changements climatiques sur le stress hydrique avec les cultivars de référence pour les municipalités à l'étude au cours de la période future 2010-2039</b>   | <b>183</b> |
| <b>Tableau 48. Impacts des changements climatiques sur le stress hydrique avec les cultivars améliorés pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039</b>   | <b>184</b> |

**Tableau 49. Impacts des changements climatiques sur la variabilité des rendements (CV) du maïs-grain des municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039 -----186**

**Tableau 50. Indicateurs de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A2 pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039 -----187**

**Tableau 51. Indicateurs de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A1B pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039 -----188**

**Tableau 52. Indicateurs moyens de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A2 pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039-----189**

**Tableau 53. Indicateurs moyens de vulnérabilité moyenne aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A1B pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039 -----189**

**Tableau 54. Indicateurs de vulnérabilité future aux conditions socio-économiques pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039 -----190**

## LISTE DES FIGURES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure 1. Localisation de la grande région de Montérégie-----</b>  | <b>7</b>  |
| <b>Figure 2. Localisation des régions d'étude-----</b>  | <b>16</b> |
| <b>Figure 3. Typologie des fermes agricoles en Montérégie-Ouest selon les superficies exploitées au cours des années 2001 et 2006 -----</b>   | <b>22</b> |
| <b>Figure 4. Typologie des fermes agricoles du Lac-St-Jean-Est selon les superficies exploitées au cours des années 2001 et 2006 -----</b>  | <b>28</b> |
| <b>Figure 5. Démarche méthodologique des études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture avec les modèles statistiques -----</b>   | <b>33</b> |
| <b>Figure 6. Schéma résumé des étapes de l'approche des analyses de rendement à partir des modèles de culture (adapté d'André et Bryant, 2001) -----</b>  | <b>36</b> |
| <b>Figure 7. Schéma général de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité multiple</b>  | <b>55</b> |
| <b>Figure 8. Approche utilisée dans l'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est pour la période de référence (1985-2005) -----</b> | <b>60</b> |
| <b>Figure 9. Principales composantes du processus d'évaluation de la capacité adaptative pour la période de référence (1985-2005) -----</b>   | <b>62</b> |
| <b>Figure 10. Processus de construction des scénarios de capacité adaptative pour la période future (2010-2039) -----</b>   | <b>68</b> |
| <b>Figure 11. Approche utilisée dans l'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain pour la période future 2010-2039 -----</b>  | <b>72</b> |
| <b>Figure 12. Diagramme de dispersion pour les différents modèles climatiques dans la région de Montérégie-Ouest -----</b>  | <b>73</b> |
| <b>Figure 13. Diagramme de dispersion pour les différents modèles climatiques dans la région du Lac-St-Jean-----</b>  | <b>74</b> |
| <b>Figure 14. Hiérarchie de facteurs de croissance et de niveaux de rendements simulés par les modèles de culture -----</b>   | <b>76</b> |
| <b>Figure 15. Étapes suivies pour la calibration du modèle CERES-Maize -----</b>  | <b>78</b> |
| <b>Figure 16. Étapes du processus de validation du modèle de culture-----</b>   | <b>81</b> |
| <b>Figure 17. Étapes de construction des scénarios de CV futur pour les superficies en maïs-grain -----</b>   | <b>84</b> |
| <b>Figure 18. Types de données utilisées dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain de la Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est--</b>                    | <b>85</b> |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure 19. Diagramme des principales composantes de DSSAT</b> .....  | 95  |
| <b>Figure 20. Diagramme des principaux modules de DSSAT</b> .....   | 95  |
| <b>Figure 21. Fonctions de température affectant le facteur de réduction photosynthétique dans 3 versions de CERES-Maize</b> .....  | 103 |
| <b>Figure 22. Fonctions de température affectant le taux de remplissage des grains dans 3 versions de CERES-Maize</b> .....   | 104 |
| <b>Figure 23. Description des données de rendements moyens (Rdt_moyen) de maïs - grain pour la Montérégie-Ouest, 1985-2005</b> .....  | 113 |
| <b>Figure 24. Carte des catégories de rendement du maïs-grain en Montérégie-Ouest, 1985-2005</b> .....  | 114 |
| <b>Figure 25. Description des séries de rendements à l'échelle des MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> .....                               | 115 |
| <b>Figure 26. Carte de rendements moyens du maïs-grain par MRC pour la Montérégie-Ouest, 1985-2005</b> .....  | 116 |
| <b>Figure 27. Description des CV des rendements (Cv-rdt) de maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> .....                             | 117 |
| <b>Figure 28. Carte de typologie de vulnérabilité des municipalités de la Montérégie-Ouest aux conditions climatiques au cours de la période 1985-2005</b> .....                          | 118 |
| <b>Figure 29. Distribution des valeurs de CV moyens des rendements du maïs-grain par MRC pour la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> ..              | 120 |
| <b>Figure 30. Carte de CV moyens des rendements de maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> .....                           | 121 |
| <b>Figure 31. Description des données de superficies moyennes en maïs-grain pour les municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> .....   | 125 |
| <b>Figure 32. Carte des superficies annuelles moyennes en production de maïs-grain des municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005</b> ..... | 126 |
| <b>Figure 33. Description des séries de superficies moyennes en maïs-grain à l'échelle des MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005</b> .....              | 127 |
| <b>Figure 34. Carte des superficies moyennes en production de maïs-grain par MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005</b> .....                            | 128 |
| <b>Figure 35. Distribution des CV des superficies moyennes en maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest, 1985-2005</b> .....   | 129 |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Figure 36. Carte de niveaux de vulnérabilité de la région agricole de Montérégie-Ouest aux conditions socio-économiques pour la période 1985-2005 -----</b>  | <b>130</b> |
| <b>Figure 37. Distribution des CV moyens de superficies en maïs-grain par MRC de la région de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005 -----</b>  | <b>132</b> |
| <b>Figure 38. Carte de CV moyens des superficies en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest, 1985-2005-----</b>   | <b>133</b> |
| <b>Figure 39. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Sainte-Martine au cours de la période 1985-2005 -----</b>  | <b>140</b> |
| <b>Figure 40. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Saint-Sébastien au cours des deux périodes 1982-2003 et 1985 à 2005-----</b>   | <b>140</b> |
| <b>Figure 41. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au cours de la période 2000 à 2005 -</b>  | <b>141</b> |
| <b>Figure 42. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération en Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>  | <b>147</b> |
| <b>Figure 43. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération au Lac-St-Jean-Est au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>   | <b>148</b> |
| <b>Figure 44. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>   | <b>150</b> |
| <b>Figure 45. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>  | <b>150</b> |
| <b>Figure 46. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine pour les agriculteurs de 48 ans et plus au cours de la période de référence, 1985-2005-----</b>   | <b>151</b> |
| <b>Figure 47. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine pour les agriculteurs de 47 ans ou moins au cours de la période de référence, 1985-2005 -----</b> | <b>151</b> |
| <b>Figure 48. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien pour les agriculteurs de 47 ans et plus au cours de la période référence, 1985-2005-----</b>     | <b>152</b> |
| <b>Figure 49. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien pour les agriculteurs de 46 ans ou moins au cours de la période de référence-----</b>            | <b>152</b> |

**Figure 50. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour les agriculteurs de 45 ans et plus au cours de la période de référence, 1985-2005 -----153**

**Figure 51. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour les agriculteurs de 44 ans ou moins, 1985-2005 -----154**

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

|        |   |
|--------|---|
| AOGCM  | Atmosphere ocean global circulation model                         |
| CARBO  | Daily biomass production  |
| CS     | Chaud et sec  |
| CSM    | Cropping system model   |
| CV     | Coefficient de variation  |
| CV-rdt | Coefficient de variation de rendements                            |
| BS     | Beauharnois-Salaberry   |
| DJ     | Degré-jour  |
| DSSAT  | Decision support system for agrotechnology transfer               |
| D3T    | Développement durable et dynamique territoriale                   |
| EF     | Efficiency model  |
| EXT    | Extinction coefficient  |
| FH     | Frais et humide   |
| GES    | Gaz à effet de serre  |
| GIEC   | Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat              |
| GPP    | Grain per plant   |
| GROGRN | Daily growth of the grain   |
| ha     | Hectare   |
| HR     | Haut-Richelieu  |
| HSL    | Haut-St-Laurent   |
| km     | Kilomètre   |
| IBSNAT | International benchmark sites network for agrotechnology transfer |

|                    |   |
|--------------------|---|
| IA                 | Indice de cohérence d'une matrice de comparaison des paires aléatoirement générées        |
| IC                 | Indice de cohérence   |
| ICA                | Indicateur de capacité adaptative   |
| ICA <sub>réf</sub> | Indicateur de capacité adaptative de référence  |
| IRDA               | Institut de recherche et de développement en agroenvironnement                            |
| IPAR               | Intercepted photosynthetic active radiation   |
| IPCC               | Intergovernmental panel on climate change   |
| ISQ                | Institut de la statistique du Québec  |
| JNV                | Jardins-de-Napierville  |
| LAI                | Leaf area index   |
| MAPAQ              | Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation du Québec                   |
| MCG                | Modèle de circulation générale  |
| MCCG               | Modèle couplé climatique global   |
| MRC                | Municipalités régionales de comté   |
| MRCC               | Modèle régional climatique canadien   |
| NDEF1              | Nitrogen water deficit factor   |
| OMC                | Organisation mondiale du commerce   |
| PAH                | Processus d'analyse hiérarchique  |
| PCARB              | Potential biomass production  |
| PLTPOP             | Plant population  |
| PRFT               | Photosynthetic reduction factor   |
| PSKER              | Taux moyen de photosynthèse entre apparition des soies et début de remplissage des grains |
| RAR                | Région agricole de recensement  |

|           |   |
|-----------|---|
| RC        | Ratio de cohérence                        |
| RD        | Différence relative                       |
| Rdt_moyen | Rendement moyen                           |
| RGFILL    | Rate of grain filling                     |
| RMSE      | Root mean square error                    |
| ROWSPC    | Row space                                 |
| RPA       | Radiation photosynthétiquement active     |
| RS        | Roussillon                                |
| RUE       | Radiation use efficiency                  |
| SRU       | Subdivisons rurales de comté              |
| SWDF      | Soil water deficit factor                 |
| TMAX      | Température maximale                      |
| Tm        | Température journalière moyenne           |
| TMIN      | Température minimale                      |
| UPA       | Union des producteurs agricoles du Québec |
| UTM       | Unités thermiques maïs                    |
| VPD       | Vapor pressure deficit                    |
| VS        | Vaudreuil-Soulanges                       |

## REMERCIEMENTS

Fruit d'un périple stimulant et intéressant, ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de plusieurs personnes. Parmi celles-ci, j'aimerais présenter mes plus vifs remerciements à :

- mes directeurs de recherche, Dr. Bhawan Singh et Dr. Christopher R. Bryant pour leur encadrement soutenu et pertinent pendant tout mon cycle d'études doctorales,
- mes parents, Pierre Pradel Déluscat et Dulia Josphe qui m'ont toujours encouragé à acquérir de nouvelles connaissances,
- ma fille, Jessica Faith, ma source intarissable d'inspiration,
- Dr. Pierre André, président du jury, pour ses conseils très utiles sur la forme et le fond du document,
- Dr. Gaétan Bourgeois, membre du jury, qui m'a non seulement accueilli avec plaisir au sein du laboratoire de bioclimatologie et modélisation d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Centre de recherche et de développement en Horticulture de Saint-Jean-sur-Richelieu), mais qui m'a également aidé à parfaire mes connaissances sur plusieurs modèles de culture,
- Dr. Chandra A. Madramootoo, évaluateur externe, qui n'a pas marchandé son expertise et dont les différentes recommandations ont permis de rehausser la qualité de la thèse,
- Mahmoud Bchini qui a accepté de réviser la forme du document,
- Marc Girard, pour le travail exceptionnel effectué dans la finition des différentes figures de la thèse,
- Diane Umuganwa qui a tout fait pour rendre agréable ce long périple, et
- mes frères et sœurs, mes camarades de promotion, mes amis d'ici et d'ailleurs et Rhode Ménard qui m'ont appuyé dans toutes les activités directement ou indirectement liées à cette thèse.

## INTRODUCTION

Il existe des opinions ou des « écoles de pensée » qui remettent en question la théorie de base des changements climatiques au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (Lindzen, 2007 ; Leroux, 2005; Michaels, 2006). Toutefois, une grande partie de la communauté scientifique avalise et utilise, à diverses fins, les différents résultats et les arguments relatifs aux éléments scientifiques des changements et variabilités climatiques présentés dans les trois premiers rapports produits par le « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC) (IPCC, 2001a). Le quatrième rapport de l'IPCC, rendu public en 2007, est sans équivoque au sujet des principales causes du réchauffement climatique. Avec un degré de certitude plus élevé, il confirme non seulement la tendance au réchauffement planétaire, mais également l'influence non négligeable des activités anthropiques sur ce phénomène. D'autre part, il présente un plus grand nombre d'évidences pour corroborer la théorie de l'influence des activités humaines sur la chimie de l'atmosphère depuis l'ère industrielle.

Cette modification des caractéristiques chimiques de l'atmosphère, notamment l'augmentation de la concentration des principaux gaz à effet de serre (GES), a et aura comme résultante un déséquilibre et un changement sans précédent des différents attributs des principaux régimes climatiques mondiaux. Parmi ces changements inhérents à une modification de la concentration des GES dans l'atmosphère, on peut citer une augmentation de la température moyenne planétaire. Celle-ci, d'après plusieurs modèles de circulation générale océan-atmosphère (AOGCM, en anglais), variera entre 1,8 et 4,0 °C d'ici 2100 par rapport à la période 1980-1999 (IPCC, 2007). Une telle hausse de la température moyenne globale est susceptible d'avoir des conséquences considérables sur l'ensemble des systèmes naturels et humains (IPCC, 2001 b ; Smith et al., 2009).

Le secteur agricole, en raison de sa forte dépendance aux conditions climatiques, semble être particulièrement menacé par ces changements climatiques, notamment une plus

grande variabilité et une augmentation de la fréquence des événements extrêmes (Bazzaz et Sombroek, 1996 ; Bryant et al., 2000; Rosenzweig et al., 2001). Devant ce nouveau défi que représentent les changements et variabilités climatiques et compte tenu de l'importance dudit secteur à plusieurs égards (sécurité alimentaire, protection de la biodiversité, source de revenus, contribution à la cohésion sociale), il s'est avéré plus qu'opportun de se pencher sur la question. Ainsi, des efforts considérables ont été consentis au cours des deux dernières décennies en vue non seulement de déterminer, avec le plus de détails et le plus de précision possibles, les différents impacts des changements climatiques sur l'agriculture, mais aussi d'en trouver des options de réponses durables (Wang et al., 1992; 1999; Reilly, 1994).

Les principales expressions de ces tentatives sont l'élaboration et la réalisation d'une gamme très diversifiée d'études scientifiques sur les aspects qui touchent les conséquences et les adaptations des systèmes agricoles aux variabilités et changements climatiques. Si ces études se ressemblent du point de vue du but poursuivi, caractérisé dans la plupart des cas par les implications biophysiques ou socio-économiques des impacts d'un réchauffement planétaire et l'identification de mesures de réponses aux conséquences potentielles de ce phénomène, il existe toutefois des points qui constituent de véritables défis pour le domaine. Ceux-ci correspondent généralement à l'élaboration d'indicateurs crédibles, à l'adoption de méthodes qui prennent également en considération les aspects socio-économiques et à l'intégration des recherches sur la gouvernance dans les mécanismes de réduction de vulnérabilité et de promotion de stratégies d'adaptation (Adger, 2006).

Malgré les multiples progrès enregistrés dans les travaux relatifs aux systèmes agricoles et les changements climatiques, des aspects qui touchent, entre autres, la mesure de la vulnérabilité continuent de faire l'objet de nombreux débats (Eakin et Luers, 2006 ; Sharma et Patwardhan, 2008). Ceux-ci portent fondamentalement sur les approches utilisées, les échelles spatiales et temporelles considérées, le choix des déterminants des composantes de la



vulnérabilité, la prise en compte des incertitudes dans les étapes de quantification et l'utilisation des études de vulnérabilité dans les processus de prises de décisions. Ces aspects qui alimentent les différentes discussions sur le concept de vulnérabilité découlent principalement de la façon d'approcher ou de formuler les liens qui existent entre les systèmes naturels et humains. **La présente étude se veut une contribution à la mesure de la vulnérabilité du secteur agricole, notamment celle des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est du Québec, par rapport aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression.** À la lumière des principaux travaux déjà effectués (Eakin et Luers, 2006 ; Luers et al., 2003; Luers 2005; Liverman, 1999; Tschakert, 2007; Wilhelmi et Wilhite, 2002) et en tenant compte des sujets de débats les plus importants dans le domaine, cette étude cherche à offrir une approche simplifiée qui intègre à la fois les dimensions biophysiques et socio-économiques dans le processus d'appréciation de l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité du secteur agricole ci-dessus mentionné. La présente étude s'articule autour d'un objectif principal et de deux objectifs spécifiques. De façon générale, elle vise à dresser un portrait de l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est aux éventuels changements et variabilités, et ceci dans un contexte d'autres sources de pressions socio-économiques. Plus spécifiquement, elle cherche à :

- 1) évaluer la vulnérabilité actuelle et future de ce secteur aux changements climatiques combinés à d'autres sources de pression, et
- 2) réaliser une analyse comparative inter et/ou infrarégionale des degrés de vulnérabilité du secteur pour les différentes périodes retenues.

Dans un souci de mettre en relief les deux principales caractéristiques du concept de vulnérabilité, à savoir ses aspects dynamique et relatif, les hypothèses retenues comme fils conducteurs de la présente étude sont formulées comme suit :

- a) dans un contexte de changements climatiques caractérisés principalement par une hausse des températures, les municipalités de la région agricole du Lac-Saint-Jean-Est, situées plus au nord et par conséquent plus éloignées du seuil maximum de la tolérance thermique du maïs-grain, connaîtront des gradients de changements de rendements positifs et supérieurs à ceux de la région agricole de Montérégie-Ouest.
- b) les municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest, peu importe le scénario de capacité adaptative considéré, seront plus vulnérables aux conditions socio-économiques que celle de la région de Lac-Saint-Jean-Est<sup>6</sup>.

Afin d'assurer une certaine cohérence entre les différentes parties de la thèse, la structure suivante a été retenue. En tout premier lieu, une présentation du portrait et de la problématique des fermes productrices de maïs-grain dans les régions à l'étude est effectuée (chapitre 1). Il s'en suit une description des régions d'étude (chapitre 2) et une synthèse de la notion de vulnérabilité et de son application dans le domaine des changements climatiques (chapitre 3). Cette synthèse porte essentiellement sur les principales disciplines ayant contribué à l'émergence ou à l'utilisation de ce concept dans le domaine des changements climatiques, sur la définition et les composantes dudit concept. Lors de cette synthèse, une attention particulière est accordée aux études visant la quantification de la vulnérabilité du secteur agricole aux changements climatiques. Au chapitre 4, l'approche méthodologique privilégiée pour mener la recherche est abordée. Aux chapitres 5 et 6 respectivement, une

---

<sup>6</sup> Cette hypothèse peut être justifiée par le fait que la proximité d'une région agricole aux grands marchés nationaux et internationaux est souvent assimilée à des conditions de production plus compétitives caractérisées par une gamme plus variée de sources de pressions socio-économiques. La capacité adaptative des fermes cultivant le maïs-grain au Lac-St-Jean-Est et dont la production est essentiellement destinée au marché local devrait être moins influencée par les moteurs de changements externes.

synthèse des données utilisées ainsi qu'une description sommaire du modèle de culture du maïs-grain retenu et de la technique d'analyse multicritère choisie sont effectuées. Les résultats essentiels et la discussion sont présentés au chapitre 7. Un regard critique est porté, à travers le chapitre 8, sur la méthodologie et les résultats qui en découlent. Finalement, les principales conclusions et recommandations de l'étude sont spécifiées.

Avant de passer à ces différentes parties de la thèse, il importe de souligner que les données qui ont servi à la simulation des rendements du maïs-grain, à l'identification des déterminants de capacité adaptative et à l'élaboration d'indicateurs de capacité adaptative ont été collectées dans le cadre d'un projet de recherche sur l'adaptation de l'agriculture québécoise aux changements et variabilités climatiques. Ce projet a été mené conjointement par les laboratoires de Développement durable et dynamique territoriale (D3T) et de climatologie du Département de géographie de l'Université de Montréal en collaboration avec le Département d'économie agricole de l'Université McGill<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Le projet de recherche a été subventionné par le Ministère des Ressources naturelles du Canada dans le cadre de son programme sur les impacts et adaptations aux changements climatiques. En tant que membre de l'équipe de ce projet, j'avais, comme mandat principal, d'effectuer la calibration et la validation des modèles de culture pour le blé et le maïs-grain, de réaliser les simulations de rendements pour ces deux cultures dans les différentes municipalités retenues par le projet, de concevoir et d'administrer le questionnaire relatif aux déterminants de capacité adaptative et au processus d'adaptation des producteurs agricoles aux variabilités et changements climatiques, d'effectuer le traitement et l'analyse des données relatives aux déterminants de capacité adaptative et de présenter les différents résultats du projet aux producteurs et professionnels agricoles concernés. Les scénarios climatiques utilisés dans la simulation des rendements, notamment ceux du maïs-grain, ont été préparés par Marylène Savoie à partir des données fournies par Ouranos, le Consortium québécois sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Par ailleurs, les déterminants potentiels utilisés dans l'analyse multicritère ont été obtenus lors des groupes de discussion réalisés dans les deux régions agricoles.

Les autres membres de l'équipe de projet étaient Christopher Bryant (Université de Montréal), chercheur principal; Bhawan Singh (Université de Montréal) et Paul Thomassin (Université McGill), Co chercheurs; Laurie Baker (ancien professeur à McGill), consultant; Serge Desroches, agent de projet impliqué dans le volet adaptation des fermes aux changements climatiques; Mélanie Doyon (Université de Montréal), coordonnatrice du projet et responsable de l'étude sur les politiques et les programmes agricoles, Marylène Savoie (étudiante graduée de l'Université de Montréal), agente de recherche responsable de l'élaboration des scénarios climatiques et de la simulation des rendements pour le soya et l'orge; Edjigayehu Seyoum (étudiante graduée de l'Université McGill), agente de recherche responsable de l'analyse économique des fermes agricoles; Michèle Boisclair et Simon Olivier Côté (étudiants gradués de l'Université de Montréal), responsables de la planification des enquêtes sur le terrain et Antoine Garcia (étudiant gradué de l'Université de Montréal), assistant aux entrevues avec les exploitants agricoles dans la région de Montérégie-Ouest.

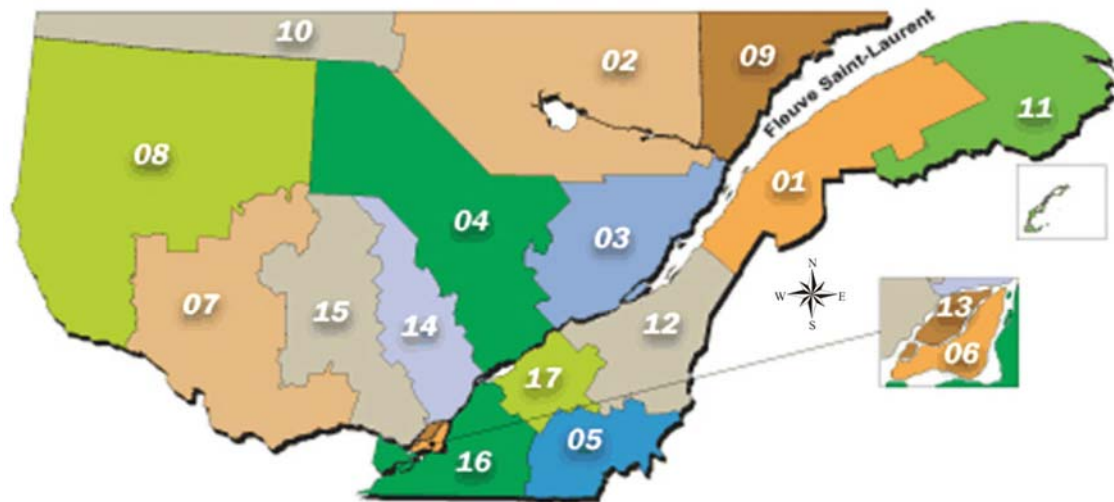
## **Chapitre 1. PORTRAIT ET PROBLÉMATIQUE DES FERMES PRODUCTRICES DE MAÏS-GRAIN DE MONTERÉGIE-OUEST ET DU LAC-ST-JEAN-EST**

### **1.1 Portrait des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest**

La culture du maïs-grain occupe une bonne partie de la superficie agricole totale de la grande région de Montérégie (Figure 1). Évaluées à 7 % de la superficie totale en production végétale de la Montérégie au cours de l'année 1991, les superficies en maïs-grain de cette région ont augmenté à 18 % en 1996 et atteint la barre des 26 % en 2001 (MAPAQ, 2006a). Cette tendance à la hausse des superficies en maïs-grain enregistrée dans la grande région agricole de Montérégie au cours de la période 1991-2001 est également constatée dans les 6 Municipalités régionales de comté (MRC) qui constituent sa partie ouest. Toutefois, au cours de l'année 2006, une certaine stagnation des superficies sous cette culture a été observée en Montérégie-Ouest (Statistique Canada, 2007). Pour les 6 MRC regroupées, la superficie en maïs-grain en Montérégie-Ouest est passée de 99 324 ha en 1991 à 117 123 ha en 2001, soit une augmentation de 15,2 % en 10 ans (Statistique Canada, 2006). Le tableau 1 présente l'évolution des superficies en maïs-grain pour les 6 MRC de la région de Montérégie-Ouest lors des recensements agricoles effectués par Statistique Canada pour les années 2001 et 2006.

En 2001, les superficies en maïs-grain étaient évaluées à 117 123 ha, soit 37,1 % de la superficie en production végétale de la région de Montérégie-Ouest. En 2006, malgré des variations pour certaines MRC, le pourcentage des superficies en maïs-grain par rapport à la superficie totale en production végétale en Montérégie-Ouest restait inchangé, soit 37,1 % représentant 114 747 ha. L'analyse du tableau 1 permet de constater une certaine concentration des superficies en maïs-grain dans la MRC du Haut-Richelieu pour les années de recensement 2001 et 2006. Estimée à 11,9 % en 2001, la part de la MRC du Haut-Richelieu en maïs-grain est passée à 12,1 % en 2006 (Statistique Canada, 2007). Outre la

MRC du Haut-Richelieu qui a connu une augmentation relative de sa part en maïs-grain, les MRC du Haut-St-Laurent et des Jardins-de-Napierville ont également vu une augmentation relative de leur part en maïs-grain entre 2001 et 2006.



01-Bas-Saint-Laurent 02-Saguenay-Lac-Saint-Jean 03-Capitale-Nationale 04-Mauricie 05-Estrie 06-Montréal  
07-Outaouais 08-Abitibi-Témiscamingue 09-Côte-Nord 10-Nord-du-Québec 11-Gaspésie-îles-de-la-Madeleine  
12-Chaudière-Appalaches 13-Laval 14-Lanaudière 15-Laurentides 16-Montréal 17-Centre-du-Québec

Figure 1. Localisation de la grande région de Montréal  
Source : MAPAQ, 2007.

Parmi les 6 MRC, deux ont connu une certaine baisse des superficies en maïs-grain entre 2001 et 2006 : ce sont les MRC de Roussillon et de Vaudreuil-Soulanges. Pour la MRC de Roussillon, il y a eu, entre 2001 et 2006, une baisse de 0,4 % des superficies en maïs-grain et pour la MRC de Vaudreuil-Soulanges, une baisse de 0,1 %. Si la superficie absolue en maïs-grain pour la MRC de Beauharnois-Salaberry a légèrement diminué entre 2001 et 2006, sa part relative pour cette culture n'a toutefois pas changé (5,0 % pour les deux années).

Tableau 1. Superficies en maïs-grain et superficies totales en production végétale pour les MRC de la région de Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC            | Superficie totale<br>en production<br>végétale<br>(ha) |               | Superficie totale en<br>maïs-grain<br>(ha) |               | Part des MRC en maïs-<br>grain par rapport à la<br>superficie totale en<br>production végétale<br>(%) |             |
|------------------------|--|---------------|--|---------------|---|-------------|
|                        | 2001   | 2006          | 2001                                       | 2006          | 2001  | 2006        |
| Beauharnois-Salaberry  | 35393  | 35224         | 15758                                      | 15457         | 5,0   | 5,0         |
| Haut-Richelieu         | 74213  | 73989         | 37568                                      | 37208         | 11,9  | 12,1        |
| Haut-Saint-Laurent     | 74872  | 72364         | 20955                                      | 20810         | 6,6   | 6,7         |
| Jardins-de-Napierville | 59118  | 58142         | 15884                                      | 16010         | 5,0   | 5,2         |
| Roussillon             | 21392  | 17056         | 8132                                       | 6905          | 2,6   | 2,2         |
| Vaudreuil-Soulanges    | 50741  | 51810         | 18826                                      | 18357         | 6,0   | 5,9         |
| <b>Total</b>           | <b>315729</b>  | <b>308585</b> | <b>117123</b>                              | <b>114747</b> | <b>37,1</b>   | <b>37,1</b> |

Source : Statistique Canada, 2006 et 2007

À l'instar des superficies, le nombre de fermes qui pratiquent la culture du maïs-grain a également connu des variations entre la période intercensitaire de 2001 et 2006. Le tableau 2 présente le nombre de fermes qui ont cultivé le maïs-grain au cours des années 2001 et 2006. Ce tableau laisse voir une nette tendance à la diminution du nombre de ces fermes pour toutes les MRC de la région de Montérégie-Ouest entre 2001 et 2006. En effet, le nombre total de fermes productrices de maïs-grain s'est réduit de 16,0 % dans la région de Montérégie-Ouest. La plus importante baisse du nombre de ces fermes a été enregistrée dans la MRC de Vaudreuil-Soulanges. Par contre, pour les MRC des Jardins-de-Napierville et du Haut-Richelieu, malgré une baisse dans le nombre de fermes productrices de maïs-grain

(Tableau 2), leur part relative en matière de superficie pour cette culture a légèrement augmenté entre 2001 et 2006 selon les données préalablement présentées au tableau 1 (Statistique Canada, 2007).

Tableau 2. Nombre de fermes productrices de maïs-grain dans les MRC de la région de Montérégie–Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC            | Nombre de fermes<br>productrices de maïs-<br>grain en 2001 | Nombre de fermes<br>productrices de maïs-<br>grain en 2006 | Variation<br>(%)                     |
|------------------------|--|--|--------------------------------------|
| Beauharnois-Salaberry  | 257  | 227  | -12,0                                |
| Haut-Richelieu         | 453  | 390  | -14,0                                |
| Haut-Saint-Laurent     | 294  | 362  | -19,0                                |
| Jardins-de-Napierville | 215  | 188  | -13,0                                |
| Roussillon             | 94   | 76   | -19,0                                |
| Vaudreuil-Soulanges    | 263  | 210  | -20,0                                |
| <b>Total</b>           | <b>1644</b>  | <b>1385</b>  | <b>Variation moyenne :<br/>-16,0</b> |

Source : Statistique Canada, 2007

## 1.2 Portrait des fermes productrices de maïs-grain au Lac-St-Jean-Est

En matière de production végétale, la région agricole du Saguenay-Lac-St-Jean (Figure 1) est généralement connue pour ses bleuetières. En 2007, cette production comptait environ 258 entreprises qui ont réalisé des ventes d'une valeur de 56 millions de dollars (MAPAQ, 2008). Toutefois, la prédominance des bleuetières n'exclut pas la pratique d'autres cultures importantes et bien ancrées aux systèmes de production agricole de cette région. Ces cultures sont surtout représentées par l'orge, l'avoine, le canola et le foin. Contrairement à la région agricole de Montérégie-Ouest, la culture du maïs-grain est très récente et peu pratiquée

dans la région agricole du Saguenay-Lac-St-Jean. À cause de conditions climatiques adverses, elle se trouve surtout concentrée dans quelques municipalités de la région agricole du Lac-St-Jean-Est.

Pour l'ensemble de cette région, les courtes séries statistiques officielles relatives aux superficies occupées par cette culture témoignent de sa faible représentativité<sup>8</sup>. En effet, son introduction dans les systèmes de production déjà en place est très récente dans la région du Lac-St-Jean-Est. Plusieurs facteurs sont à l'origine de l'intégration du maïs-grain dans cette région. Du point de vue économique, on peut citer les programmes d'assurances de la Financière agricole du Québec et la baisse des marges de bénéfices pour certaines cultures comme le canola (Giguère, 2000). Sur le plan technique, l'introduction de cette culture dans la région du Lac-St-Jean-Est est grandement favorisée par les progrès enregistrés dans le développement de cultivars plus hâtifs et par conséquent mieux adaptés aux conditions climatiques de la zone, notamment la longueur de la période sans gel.

Si le nombre de fermes qui s'adonnent à la culture du maïs-grain était trop faible pour que soient présentées des statistiques détaillées à l'échelle des municipalités, les données regroupées au niveau de la région agricole en 2001 ont permis d'estimer les superficies sous cette culture à environ 498 ha. En 2006, une nette augmentation de ces superficies a été constatée. En effet, pour l'année 2006, les superficies en maïs-grain pour la région du Lac-St-Jean-Est étaient évaluées à 946 ha<sup>9</sup>, soit une augmentation de 90 % en 5 ans (Statistique Canada, 2008).

Le tableau 3 présente, pour les différentes municipalités de la région agricole du Lac-St-Jean-Est, les superficies en maïs-grain ainsi que le nombre de fermes pratiquant cette culture au cours de l'année 2006. Comme le laisse voir le tableau 3, sur un total de 15 municipalités

---

<sup>8</sup> Cette situation justifie le fait qu'il n'a pas été possible de dresser un portrait relativement détaillé des fermes productrices de maïs-grain du Lac-St-Jean-Est comme c'était le cas pour celles de la région de Montérégie-Ouest.

<sup>9</sup> Ces superficies demeurent toujours très petites par rapport à celles de la région de Montérégie-Ouest.



qui composent la région agricole du Lac-St-Jean-Est, la culture du maïs-grain a été pratiquée en 2006 au niveau de 7 d'entre elles uniquement. Il demeure vrai que l'introduction de la culture du maïs-grain dans cette région est à ses débuts.

Tableau 3. Fermes productrices de maïs-grain dans les municipalités de la région agricole du Lac-St-Jean-Est au cours de l'année 2006

| Nom des Municipalités         | Superficies en maïs-grain pour<br>l'année 2006<br>(ha) | Nombre de fermes déclarantes |
|-------------------------------|--|------------------------------|
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan  | 178  | 6                            |
| Hébertville                   | 291  | 7                            |
| Saint-Bruno                   | 99   | 3                            |
| Saint-Gédéon                  | 187  | 5                            |
| Alma                          | x <sup>10</sup>  | 2                            |
| Saint-Nazaire                 | X  | 1                            |
| Labrecque                     | 0  | 0                            |
| Lamarche                      | 0  | 0                            |
| L'Ascension-de-Notre-Seigneur | 0  | 0                            |
| Saint-Henri-de-Taillon        | X  | 1                            |
| Sainte-Monique                | 0  | 0                            |
| Saint-Ludger-de-Milot         | 0  | 0                            |
| Lac-Moncouche                 | 0  | 0                            |
| Lac-Achouakan                 | 0  | 0                            |
| Belle-Rivière                 | 0  | 0                            |
| <b>Total</b>                  | <b>946</b>   | <b>25</b>                    |

Source : Statistique Canada, 2008

---

<sup>10</sup> x : Données confidentielles en vertu des dispositions de la Loi sur la statistique.

### **1.3 Problématique des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est**

La structure et le mode de gestion des fermes productrices de maïs-grain sont généralement influencés par leur environnement décisionnel. Celui-ci est dans la majorité des cas très complexe et constitué de toute une gamme d'acteurs avec des intérêts très divers et de facteurs tant internes qu'externes au secteur. Dans une perspective de politiques orientées vers une meilleure gouvernance environnementale, une réduction appropriée des gaz à effet de serre, une croissance de la population mondiale, le Canada, notamment le Québec s'efforcera d'augmenter à court, moyen et long terme, sa productivité agricole tout en adoptant des pratiques culturales et des sources énergétiques plus respectueuses de l'environnement (Ressources Naturelles Canada, 2008). Cette augmentation des rendements agricoles sera justifiée par la nécessité de répondre, entre autres, aux besoins en denrées alimentaires sans précédent des pays émergents et surtout des pays en développement. Pour les pays émergents, ces besoins résulteront d'une combinaison de deux facteurs, soit la croissance démographique et l'augmentation du pouvoir d'achat ou du niveau de vie. Pour les pays en développement, cette plus grande nécessité pour les denrées alimentaires viendra principalement d'une baisse de leur production agricole, car ils possèdent dans la plupart des cas une faible capacité d'adaptation à un climat plus variable et à une intensification de la fréquence d'événements climatiques extrêmes (Boko et al., 2007 ; Nimura et al., 2007).

Devant un tel scénario, avec des progrès technologiques appropriés et sous des conditions climatiques plus chaudes, la culture du maïs-grain, notamment en ce qui concerne les superficies occupées et la productivité, est susceptible de subir des transformations sans précédent dans les deux régions agricoles retenues (Agriculture Canada 2006, 2002 ; MAPAQ, 2006a). Toutefois, ces modifications appréhendées, et plus particulièrement celles relatives à un accroissement de la production et de la productivité du maïs-grain devraient

également faire face, à différentes échelles géographiques, à des enjeux tant environnementaux que socio-économiques (UPA, 2004 ; MAPAQ, 2005).

Aux niveaux régional et national, les fermes productrices de maïs-grain devront faire face à plusieurs défis, particulièrement l'étalement urbain, le vieillissement de la population agricole, le manque de relève agricole, l'augmentation des coûts de production, l'érosion des sols, la pression des groupes écologiques ou environnementaux pour réduire la pollution diffuse et autres types de contamination résultant de certaines pratiques agricoles, la compétition des autres utilisateurs des ressources hydriques, les bioravageurs, les programmes en matière de biocarburant et les politiques agricoles. Au niveau international, les accords de libre-échange régional et bilatéral, les politiques de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), les subventions agricoles dans certains pays producteurs de maïs-grain, notamment les États-Unis, les activités de « dumping » et les fluctuations du dollar canadien par rapport à certaines principales devises étrangères sont autant de facteurs susceptibles d'influencer le niveau de revenu, de rentabilité et de durabilité des fermes productrices de maïs-grain des zones d'étude. Tout ceci est susceptible de modifier voire complexifier l'environnement décisionnel du secteur des fermes productrices de maïs-grain.

Par ailleurs, compte tenu de l'intervalle de temps requis par les processus de rétroactions du système climatique, même si on arrivait à respecter les objectifs d'émission de gaz à effet de serre fixés par le protocole de Kyoto, ce qui est loin d'être le cas, ce secteur de production sera très probablement confronté à des modifications climatiques auxquelles il devra s'adapter. La façon dont sont gérées et abordées ces problématiques locales, régionales et internationales, contribuera à façonner, dans un contexte de multiples sources de pression incluant les variabilités et changements climatiques, le degré de vulnérabilité future des fermes productrices de maïs-grain des différentes municipalités qui constituent les régions

agricoles de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est. Le contexte général dans lequel évoluent ces fermes est présenté dans les grandes lignes au chapitre 2 suivant.

## **Chapitre 2. DESCRIPTION DES ZONES D'ÉTUDE**

Situés approximativement aux extrémités sud et nord du Québec (Figure 2), la Montérégie-Ouest et le Lac-St-Jean-Est ont été retenus en vue d'évaluer les aspects dynamique et relatif du concept de vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain aux changements climatiques dans un contexte d'autres sources de pressions. Si la région agricole de Montérégie-Ouest a été principalement choisie pour l'importance de la culture du maïs-grain dans ses systèmes de production actuels (MAPAQ, 2006 a), celle du Lac-St-Jean-Est a été plutôt sélectionnée en fonction de ses potentialités futures sous des conditions climatiques changeantes qui se traduiraient entre autres par une augmentation du nombre des Unités thermiques maïs (UTM) et du nombre de jours sans gel (Bélanger et Bootsma, 2002). En outre, advenant l'application de stratégies ou de politiques de diversification<sup>11</sup> de l'agriculture, cette culture pourrait, sous des conditions climatiques plus chaudes, occuper une place importante dans les systèmes de production déjà en place dans cette région agricole septentrionale du Québec.

### **2.1 Région de Montérégie-Ouest**

D'une superficie totale estimée à 4651 km<sup>2</sup>, la région agricole de Montérégie-Ouest, dénommée jadis le sud-ouest de Montréal, est située entre 44 et 46 ° de latitude nord et entre 72 et 76 ° de longitude ouest. Comme indiqué à la figure 2 et au tableau 4, la région de Montérégie-Ouest est constituée de 97 municipalités regroupées en 6 MRC. La plus petite et la plus peuplée de celles-ci est la MRC de Roussillon qui fait environ 422 km<sup>2</sup> et possède une densité de population de 388 hab./km<sup>2</sup>. La plus grande MRC et la moins peuplée de cette

---

<sup>11</sup> Selon les données du Recensement de l'agriculture de 2006, les provinces qui ont enregistré le plus faible taux de diminution du nombre de fermes agricoles sont celles qui avaient une agriculture plus diversifiée. De ce fait, certaines politiques qui encouragent une diversification de l'agriculture sont susceptibles d'être élaborées en vue de remédier au problème de diminution du nombre de fermes agricoles.

région est le Haut-Saint-Laurent avec ces 1168 km<sup>2</sup> et une densité de population de 21,2 hab./km<sup>2</sup>. Il est important de signaler que toutes les MRC de la région de Montérégie-Ouest possèdent une densité de population supérieure à celle de la province du Québec estimée à 5,9 hab./km<sup>2</sup> (ISQ, 2008). À certains égards, ces informations sur la densité de population peuvent renseigner sur la pression exercée, entre autres, sur le capital foncier de cette région comparativement à d'autres zones de la province du Québec. À des fins de recensement agricole, les entités compétentes de Statistique Canada ont subdivisé les MRC en des unités administratives plus petites couramment connues sous le nom de « Subdivisions rurales de recensement » (SRU). Celles-ci représentent en général le regroupement ou la combinaison de subdivision de recensement plus petite et plus urbaine avec la subdivision de recensement avoisinante, plus grande et plus rurale (Statistique Canada, 2008). Au total, on compte 62 SRU dans la région de Montérégie-Ouest (Figure 2). Le nombre de SRU par MRC pour la Montérégie-Ouest est présenté au tableau 5.

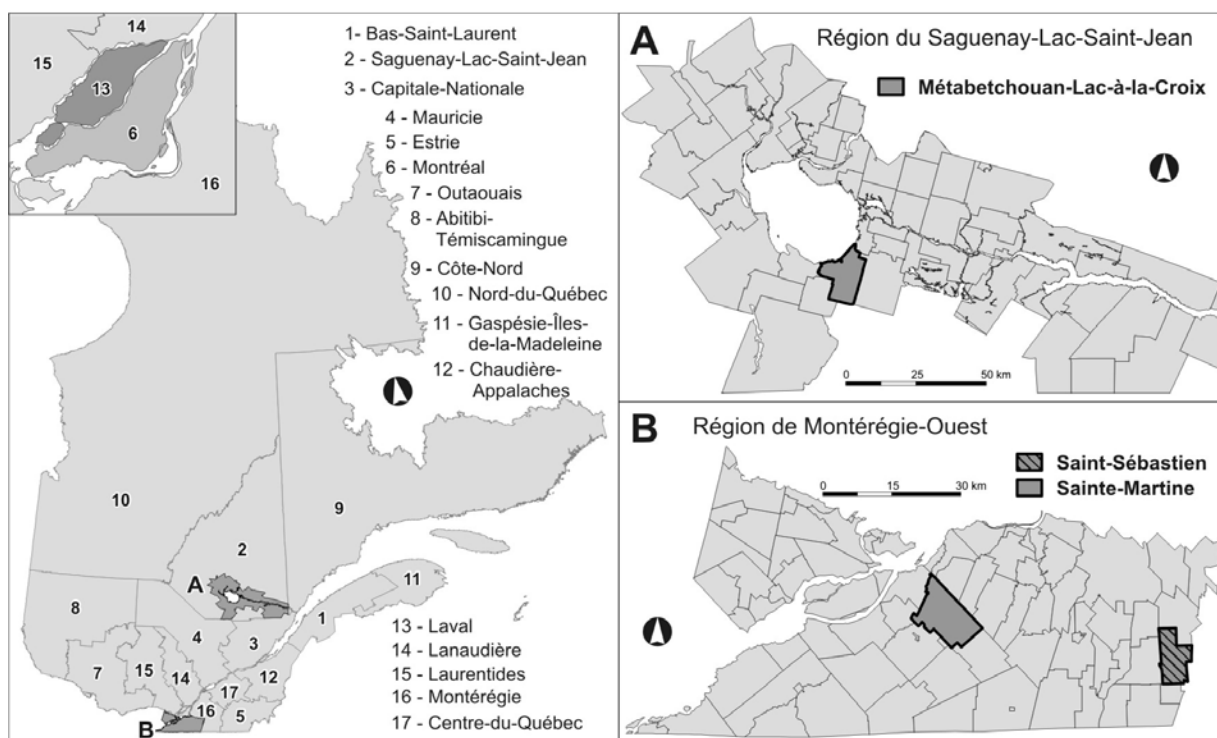


Figure 2. Localisation des régions d'étude

Tableau 4. Liste et superficie des municipalités faisant partie des 6 MRC de la Montérégie-Ouest

| Nom des MRC            | Superficie (km <sup>2</sup> ) | %          | Municipalités  |
|------------------------|-------------------------------|------------|--|
| Beauharnois-Salaberry  | 469                           | 10,1       | Beauharnois et Maple Grove, Grande-Ile et Salaberry de Valleyfield<br>St-Etienne de Beauharnois, St-Louis de Gonzague<br>St-Stanislas-deKotska, St-Timothée et Melocheville<br>St-Paul-de-Chateauguay et Sainte-Martine<br>St-Urbain-Premier   |
| Haut-Richelieu         | 936                           | 20,1       | Henryville et Henryville village, L'Acadie<br>Mont-St-Grégoire<br>Notre-Dame-du-Mont-Carmel et Lacolle<br>Noyan, St-Alexandre<br>St-Athanase, St-Blaise<br>St-Georges-de-Clarenceville et Venise-en-Québec<br>St-Jean-sur-Richelieu, St-Luc<br>St-Paul-de-l'Ile-aux-Noix, Saint-Sébastien<br>St-Valentin, Ste-Anne-de-Sabrevois<br>Ste-Brigide d'Iberville |
| Haut-Saint-Laurent     | 1168                          | 25,1       | Dundee, Elgin<br>Franklin, Godmanchester et Havelock<br>Hinchinbrooke, Huntingdon<br>Ormstown,<br>St-Jean-Chrysostome et St-Malachie et Très-St-Sacrement et Howick  |
| Jardins-de-Napierville | 802                           | 17,2       | Hemmingford, St-Bernard-de-Lacolle<br>St-Cyprien et Napierville<br>St-Clotilde-de-Châteauguay<br>St-Édouard, St-Jacques-le-Mineur<br>St-Michel, St-Patrice-de-Sherrington<br>St-Rémi   |
| Roussillon             | 422                           | 9,1        | Candiac, Châteauguay et Léry<br>Delson, Laprairie, Mercier<br>St-Constant et Ste-Catherine<br>St-Isidore, St-Mathieu, St-Philippe  |
| Vaudreuil-Soulanges    | 854                           | 18,4       | Coteau-du-Lac, Hudson, Les Cèdres, Les Coteaux<br>Notre-Dame-de-l'Ile Perrot<br>Pointe-Fortune et Rigaud<br>Rivière Beaudette, St-Clet<br>St-Lazarre, St-Polycarpe, St-Télesphore, St-Zotique<br>Ste-Justine-de-Newton, Ste-Marthe<br>Très-St-Rédempteur, Vaudreuil-Dorion   |
| <b>Total</b>           | <b>4651</b>                   | <b>100</b> |  |

Source : Statistique Canada (2002)

Tableau 5. Nombre de SRU pour les différents MRC de la Montérégie-Ouest

| <b>MRC</b>             | <b>Nombre de SRU</b> |
|------------------------|----------------------|
| Beauharnois-Salaberry  | 7                    |
| Haut-Richelieu         | 16                   |
| Haut-Saint-Laurent     | 11                   |
| Jardins-de-Napierville | 9                    |
| Roussillon             | 8                    |
| Vaudreuil-Soulanges    | 11                   |

Source : Statistique Canada (2002)

L'agriculture représente un moteur économique important pour la Montérégie-Ouest. Celle-ci, surnommée à la fois le jardin et le verger du Québec, doit sa vocation agricole à un climat relativement clément et à la qualité de ses sols (MAPAQ, 2006a). Les données suivantes permettent de se faire une idée des caractéristiques climatiques de la région d'étude (MAPAQ, 2006b) :

- Le climat est parmi les plus chauds du Québec (Morissette, 1972). On y trouve des municipalités qui disposent jusqu'à 3000 Unités Thermiques Maïs (UTM) et jusqu'à 2100 degrés-jours à base 5, c'est-à-dire au-dessus de 5 °C.
- La période sans gel peut atteindre jusqu'à 160 jours, allant généralement de la mi-avril à la mi-octobre.
- Pendant la saison de croissance, les précipitations totales varient entre 500 mm et 600 mm. Pendant cette période, il est également possible d'enregistrer, durant les mois de juillet et d'août, des périodes de déficit hydrique.

Les sols gleyifiés constituent les principaux types génétiques de sols de la Montérégie-Ouest. Généralement caractérisés par l'argile, d'un mélange d'argile et de sable et quelques



poches de terres noires (principalement retrouvées dans la MRC des Jardins-de-Napierville) et de sable, ces sols possèdent un potentiel agricole qualifié de bon à excellent (Morissette, 1972; MAPAQ, 2006a). Environ 85 % de la superficie totale de cette région possède un excellent potentiel agricole, ce qui est de loin supérieur au pourcentage de toute la province pour la même classe de sols. Toutefois, ces sols se trouvent confrontés parfois à un faible niveau de drainage qui complique un peu la réalisation de certaines opérations agricoles, notamment les travaux de préparation des sols et les semis (Morissette, 1972).

Si l'on exclut les collines Montérégiennes, la morphologie du territoire de la Montérégie-Ouest est généralement plate avec des pentes qui varient entre 1 et 3 % (MAPAQ, 2006a). Les zones plates sont constituées de vastes plaines dont l'altitude varie entre 0 et 50 mètres pour les basses plaines, entre 50 et 120 mètres pour les plaines ondulées et entre 175 et 360 mètres pour les zones de plateau. Les eaux de surface des différentes MRC de la Montérégie-Ouest sont drainées par trois principaux cours d'eau, soit le fleuve St-Laurent et les rivières Richelieu et Châteauguay.

En 2001, la Montérégie-Ouest comptait 3153 fermes agricoles, représentant 41 % et 10 % du nombre total de fermes recensées dans la grande région de la Montérégie et de la province du Québec, respectivement (Statistique Canada, 2006). En 2006, on n'en comptait que 2887 dans la région, soit une diminution de 8 % en 5 ans (Statistique Canada, 2008). La répartition et l'évolution des fermes agricoles par MRC de la Montérégie-Ouest sont présentées au tableau 6 pour les années 2001 et 2006. Celui-ci permet de constater une certaine concentration (environ 65 % pour les années 2001 et 2006) des fermes agricoles dans 3 MRC soit celles du Haut-Richelieu, du Haut-St-Laurent et des Jardins-de-Napierville. Entre 2001 et 2006, toutes les MRC de la Montérégie-Ouest ont enregistré une baisse dans le nombre de fermes agricoles (Statistique Canada, 2008).

Tableau 6. Répartition et évolution des fermes agricoles par MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC               | Nombre de fermes agricoles |             | Part des fermes agricoles en % |              |
|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|
|                           | 2001                       | 2006        | 2001                           | 2006         |
| Beauharnois-Salaberry     | 348                        | 325         | 11,0                           | 11,3         |
| Haut-Richelieu            | 672                        | 618         | 21,3                           | 21,4         |
| Haut-Saint-Laurent        | 695                        | 648         | 22,0                           | 22,4         |
| Jardins-de-Napierville    | 685                        | 607         | 21,7                           | 21,0         |
| Roussillon                | 217                        | 197         | 6,9                            | 6,8          |
| Vaudreuil-Soulanges       | 536                        | 492         | 17,0                           | 17,0         |
| <b>Total<sup>12</sup></b> | <b>3153</b>                | <b>2887</b> | <b>100,0</b>                   | <b>100,0</b> |

Source : Statistique Canada (2006)

La superficie totale des fermes agricoles par MRC au cours des années 2001 et 2006 est présentée au tableau 7. À l'instar du nombre de fermes agricoles, celui-ci laisse voir une plus grande part pour 3 des MRC soit celles du Haut-Richelieu, du Haut-St-Laurent et des Jardins-de-Napierville. Combinées, les superficies agricoles de ces 3 MRC représentaient plus de 65 % et plus de 66 % de la superficie totale de l'ensemble des fermes de la Montérégie-Ouest pour les années 2001 et 2006, respectivement. À l'exception de la MRC de Vaudreuil-Soulanges, il est important de signaler une légère tendance à la baisse des superficies agricoles pour les 5 autres MRC de la région de Montérégie-Ouest. La MRC de Roussillon accusait la plus faible valeur de superficies agricoles, tandis que le Haut-Richelieu en avait la plus forte valeur (Statistique Canada, 2008).

---

<sup>12</sup> Les chiffres ayant été arrondis, les sommes ne correspondent pas forcément aux totaux indiqués.

Tableau 7. Répartition et évolution des superficies des fermes agricoles pour les MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC            | Nombre de fermes agricoles |             | Superficie (ha) |                | Part de la MRC par rapport à la superficie agricole totale de Montérégie-Ouest (%) |              |
|------------------------|----------------------------|-------------|-----------------|----------------|--|--------------|
|                        | 2001                       | 2006        | 2001            | 2006           | 2001   | 2006         |
| Beauharnois-Salaberry  | 348                        | 325         | 35 393          | 35 224         | 11,2   | 11,4         |
| Haut-Richelieu         | 672                        | 618         | 74 213          | 73 989         | 23,5   | 24,0         |
| Haut-Saint-Laurent     | 695                        | 648         | 74 872          | 72 364         | 23,7   | 23,4         |
| Jardins-de-Napierville | 685                        | 607         | 59 118          | 58 142         | 18,7   | 18,8         |
| Roussillon             | 217                        | 197         | 21 392          | 17 056         | 6,8  | 5,5          |
| Vaudreuil-Soulanges    | 536                        | 292         | 50 741          | 51 810         | 16,0   | 16,8         |
| <b>Total</b>           | <b>3153</b>                | <b>2887</b> | <b>315 729</b>  | <b>308 585</b> | <b>100,0</b>   | <b>100,0</b> |

Source : Statistique Canada, 2006, 2008

À l'intérieur des 6 MRC de la Montérégie-Ouest, la superficie totale par fermes agricoles est très variable. Toutefois, on constate une présence plus marquée des fermes avec une superficie allant de 4 à 52 ha. Les fermes qui disposent ou exploitent des superficies supérieures à 304 ha ou inférieures à 4 ha sont très marginales dans la zone (Figure 3). Les fermes agricoles de moins de 4 ha sont surtout présentes dans la MRC du Haut-Richelieu. Sur un total de 162 fermes de moins de 4 ha recensées en 2001 en Montérégie-Ouest, 60 de celles-ci, soit 37 %, étaient situées dans la MRC du Haut-Richelieu (Statistique Canada, 2006). En 2006, la MRC du Haut-Richelieu avait toujours le plus grand nombre de fermes dans cette

catégorie de superficies : sur un total de 193 fermes de moins de 4 ha, on y dénombrait 60. La figure 3 permet également de constater, entre 2001 et 2006, une augmentation du nombre de fermes de moins de 4 ha et aussi de celles de plus de 304 ha (Statistique Canada, 2008).

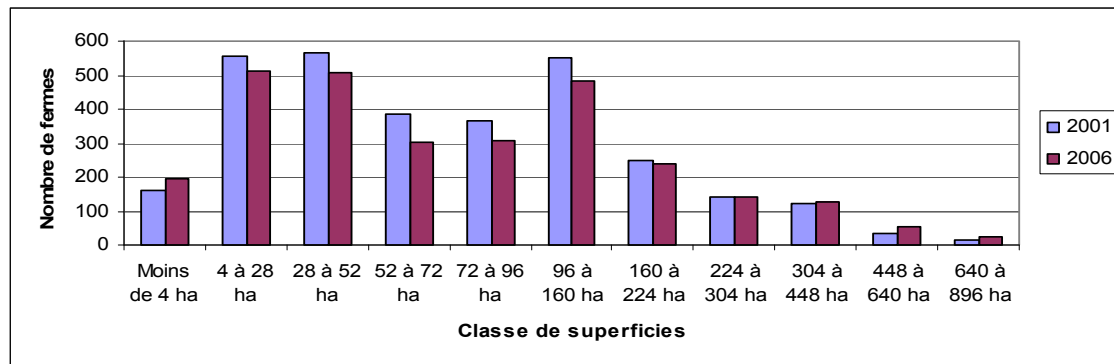


Figure 3. Typologie des fermes agricoles en Montérégie-Ouest selon les superficies exploitées au cours des années 2001 et 2006

Source : Statistique Canada, 2006, 2008

Selon le mode d'exploitation ou la forme juridique, les fermes individuelles à propriété unique ont diminué en Montérégie-Ouest entre les périodes 2001 et 2006. Cette diminution est évaluée à 15,9 % pour cette région. Cette tendance à la baisse de l'effectif des fermes exploitées sous cette forme juridique est également observée au niveau des 6 MRC qui constituent la Montérégie-Ouest (Tableau 8). Les MRC de Beauharnois-Salaberry et des Jardins-de-Napierville ont connu la plus forte baisse pour les fermes exploitées sous forme individuelle à propriété unique.

Tableau 8. Évolution des fermes individuelles à propriété unique en Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC            | Nombre de fermes individuelles à propriété unique |             | Changement (%) |
|------------------------|---|-------------|----------------|
|                        | 2006  | 2001        |                |
| Beauharnois-Salaberry  | 136   | 169         | -19,5          |
| Haut-Richelieu         | 247   | 289         | -14,5          |
| Haut-Saint-Laurent     | 330   | 390         | 15,3           |
| Jardins-de-Napierville | 298   | 370         | -19,4          |
| Roussillon             | 105   | 127         | -17,3          |
| Vaudreuil-Soulanges    | 266   | 298         | -10,7          |
| <b>Total</b>           | <b>1382</b>                                       | <b>1643</b> |                |

Source : Statistique Canada, 2006, 2008

Entre les années 2000 et 2005, les dépenses<sup>13</sup> liées au fonctionnement des exploitations agricoles en Montérégie-Ouest ont connu une plus grande augmentation que les revenus agricoles bruts. En effet, au cours de cette période, les dépenses ont augmenté de 20,4 % tandis que les revenus agricoles bruts<sup>14</sup> n'ont augmenté que de 19,4 % (Statistique Canada, 2008).

Les montants dépensés par ferme déclarante et selon le type de main-d'œuvre indiquent une relative prépondérance du travail rémunéré non familial. Comme indiqué au tableau 9, pour l'année 2000, à l'exception des MRC de Beauharnois-Salaberry et du Haut-St-Laurent, les montants versés à la main-d'œuvre non familiale étaient supérieurs à ceux versés

<sup>13</sup> Ces dépenses ne comprennent pas l'amortissement ni les déductions par amortissement.

<sup>14</sup> Ces revenus excluent les produits forestiers vendus.

pour les travaux effectués par les membres des familles des exploitations agricoles. En 2005, ce même cas de figure a été constaté dans ces deux MRC. En 2000 et 2005, la MRC des Jardins-de-Napierville a accusé le montant le plus élevé attribué au travail non familial, tandis que la MRC de Beauharnois-Salaberry était celle dont le montant alloué à la main-d'œuvre non familiale était le plus faible. Entre 2000 et 2005, il a été constaté une tendance générale à l'augmentation des montants alloués à la main-d'œuvre non familiale. À l'exception de la MRC des Jardins-de-Napierville, cette même tendance, en l'occurrence la hausse des montants versés, a été également observée au niveau de la main-d'œuvre familiale (Statistique Canada, 2008).

Tableau 9. Évolution des montants dépensés par les fermes agricoles selon le type de main-d'œuvre en Montérégie-Ouest au cours des années 2000 et 2005

| Nom des MRC            | Familiale   |      |                 |            | Non Familiale |      |                 |            |
|------------------------|-------------|------|-----------------|------------|---------------|------|-----------------|------------|
|                        | Fermes      |      | Montant         |            | Fermes        |      | Montant         |            |
|                        | déclarantes |      | ( $\text{\$}$ ) |            | déclarantes   |      | ( $\text{\$}$ ) |            |
|                        | 2000        | 2005 | 2000            | 2005       | 2000          | 2005 | 2000            | 2005       |
| Beauharnois-Salaberry  | 138         | 132  | 3 944 904       | 4 416 054  | 113           | 112  | 1 881 445       | 2 053 922  |
| Haut-Richelieu         | 241         | 234  | 6 684 587       | 7 546 613  | 258           | 213  | 7 375 677       | 8 029 638  |
| Haut-Saint-Laurent     | 232         | 229  | 5 595 367       | 6 297 367  | 217           | 209  | 4 614 970       | 4 654 426  |
| Jardins-de-Napierville | 246         | 234  | 13 216 177      | 12 824 649 | 298           | 253  | 24 345 592      | 32 018 677 |
| Roussillon             | 73          | 65   | 3 135 447       | 3 386 966  | 86            | 64   | 4 823 822       | 6 157 806  |
| Vaudreuil-Soulanges    | 145         | 136  | 4 055 460       | 5 210 595  | 162           | 137  | 6 772 858       | 7 346 715  |

Source : Statistique Canada, 2006, 2008

La valeur marchande du capital agricole, constitué essentiellement de la machinerie, du matériel et des équipements agricoles, des animaux et des volailles, des terres et bâtiments

possédés ou loués, est présentée pour les différentes MRC de la Montérégie-Ouest pour les années 2001 et 2006 (Tableau 10). Les MRC du Haut-Richelieu et des Jardins-de-Napierville possèdent un capital agricole très important évalué à près de 50% du capital agricole total de la Montérégie-Ouest, estimée à plus de 3 milliards de dollars canadiens. Pour les deux années de recensement 2001 et 2006, la MRC de Roussillon accusait la plus petite valeur marchande en ce qui a trait au capital agricole.

Tableau 10. Évolution du capital agricole par MRC de la Montérégie-Ouest au cours des années 2001 et 2006

| Nom des MRC            | Nombre de<br>fermes agricoles |             | Valeur totale du capital<br>agricole |                      | Part des<br>MRC en % |              |
|------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------|
|                        | 2001                          | 2006        | 2001                                 | 2006                 | 2001                 | 2006         |
| Beauharnois-Salaberry  | 348                           | 325         | 417 584 208                          | 443 571 860          | 12,7                 | 11,6         |
| Haut-Richelieu         | 672                           | 618         | 898 338 138                          | 985 453 554          | 27,4                 | 25,9         |
| Haut-Saint-Laurent     | 695                           | 648         | 58 5539 102                          | 742 800 269          | 17,9                 | 19,5         |
| Jardins-de-Napierville | 685                           | 607         | 627 724 706                          | 777 192 452          | 19,1                 | 20,4         |
| Roussillon             | 217                           | 197         | 235 869 083                          | 228 527 099          | 7,2                  | 6,0          |
| Vaudreuil-Soulanges    | 536                           | 492         | 514 492 059                          | 632 556 633          | 15,7                 | 16,0         |
| <b>Total</b>           | <b>3153</b>                   | <b>2887</b> | <b>3 279 547 296</b>                 | <b>3 810 101 867</b> | <b>100,0</b>         | <b>100,0</b> |

Source : Statistique Canada, 2006, 2008

La grande région de Montérégie contribue de façon significative à l'ensemble de la production végétale de la province de Québec. En 2001, on pouvait y compter 83 % de la superficie dédiée aux légumes de transformation, 77 % des hectares cultivés en légumes frais, et respectivement 57 % et 59 % de la superficie totale québécoise cultivée en soya et en maïs-grain (MAPAQ, 2006a). Dans une large mesure, la Montérégie contribue à faire du Québec,

la deuxième grande région en matière de production de maïs-grain à l'échelle du Canada<sup>15</sup> (Statistique Canada, 2008).

## 2.2 Région du Lac-St-Jean-Est

La MRC du Lac-St-Jean-Est figure parmi les 8 MRC qui constituent la Région agricole de recensement (RAR) du Saguenay-Lac-St-Jean-Côte-Nord (Statistique Canada, 2008). D'une superficie de 2771 km<sup>2</sup>, la MRC du Lac-St-Jean-Est est située au-dessus du 48<sup>e</sup> parallèle au nord de l'équateur et entre 70° et 74° de longitude ouest. Composée de 16 SRU, cette MRC possède une densité de population estimée à 18,6 hab. /km<sup>2</sup> (ISQ, 2008). Cette densité de population est plus faible que celle de toutes les MRC de la région de Montérégie-Ouest, mais relativement plus élevée que celle de la province du Québec.

Le secteur agricole occupe également une place importante dans l'économie de la province en général et de la grande région du Saguenay-Lac-St-Jean en particulier. Au sein de celle-ci, elle fournit en moyenne 1 emploi sur 8 et contribue à hauteur de 4 % au niveau du PIB de la province (ISQ, 2008). La relative diversité agricole de cette région est due, entre autres, au régime climatique et aux particularités pédologiques. En matière de régime climatique, les caractéristiques suivantes de la grande région du Saguenay-Lac-St-Jean peuvent être mentionnées (MAPAQ, 2008) :

- Deux régions climatiques distinctes provoquées par la présence du lac St-Jean.
- La région climatique située au sud du lac St-Jean et le long de la rivière Saguenay est considérée comme la partie la plus propice aux activités agricoles. Sa période sans gel, entre mai et septembre, peut atteindre jusqu'à 110 jours avec une probabilité de 90 %. Le nombre de degrés-jours annuels au-dessus de 5 °C varie entre 1381 et 1567,

---

<sup>15</sup> Les plus grandes superficies en maïs-grain se retrouvent en Ontario (Statistique Canada, 2008).



soit environ 500 unités de moins que la région de Montérégie-Ouest. Les précipitations totales enregistrées pendant la période sans gel sont généralement inférieures à celles de la région de Montérégie-Ouest. Elles varient entre 360 et 510 mm.

- Les régions situées au nord et à l'ouest du lac St-Jean sont généralement plus froides et plus sèches. La période sans gel est relativement courte, soit 95 jours environ. Les degrés-jours annuels au-dessus de 5 °C dépassent rarement 1381. Les précipitations totales pendant la période sans gel sont généralement inférieures à 460 mm.

Du point de vue génétique, les terrasses argileuses des régions du Lac-St-Jean et d'une partie de la vallée du Saguenay sont, à l'instar des basses terres de la Montérégie-Ouest, issues des sols gleyifiés (Morissette, 1972). Ces sols argileux, mis à part leur caractéristique de mauvais drainage, offrent généralement de bonnes potentialités agricoles.

En 2006, la MRC du Lac-St-Jean-Est comptait environ 325 fermes agricoles, soit plus d'un quart du nombre total des fermes recensées pour la grande région agricole du Saguenay-Lac-St-Jean-Côte-Nord. Entre 2001 et 2006, une certaine baisse du nombre de fermes au sein de cette MRC a été constatée. Elles étaient évaluées à 363 en 2001 (Statistique Canada, 2008). Contrairement au nombre de fermes, les superficies agricoles de la MRC du Lac-St-Jean-Est ont légèrement augmenté, elles sont passées de 51 093 ha en 2001 à 51 838 ha en 2006, soit une augmentation de 1,4 % (Statistique Canada, 2008). En ce qui concerne leur étendue, les fermes dont les superficies se retrouvent entre les catégories 52 et 72 ha et entre 160 et 224 ha sont les plus représentées (Figure 4). Bien qu'une certaine tendance à la hausse pour ces catégories ait été observée entre 2001 et 2006, les fermes avec des superficies supérieures à 448 ha sont marginales dans cette MRC.

Pour les fermes individuelles à propriété unique, contrairement à la Montérégie-Ouest, une certaine augmentation de celles-ci a été constatée entre 2001 et 2006 dans la MRC de

Lac-St-Jean-Est. En effet, le nombre des fermes individuelles à propriété unique pour cette MRC est passé de 127 en 2001 à 156 en 2006, soit une augmentation de 22,9 %. Par ailleurs, pour les périodes censitaires 2001 et 2006, l'augmentation des revenus agricoles bruts (excluant les produits forestiers vendus) était supérieure à celle des dépenses. Les revenus agricoles bruts ont connu une augmentation de 26,0 % entre 2001 et 2006, tandis que celle pour les dépenses était de 22,0 % (Statistique Canada, 2008).

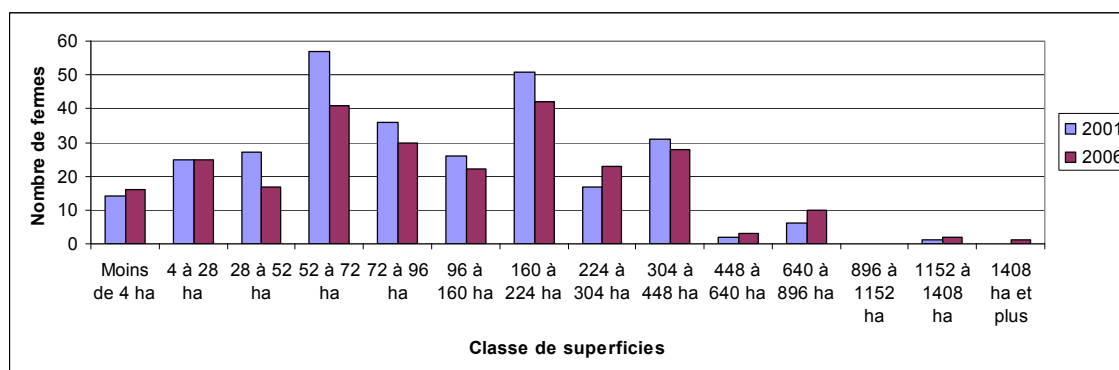


Figure 4. Typologie des fermes agricoles du Lac-St-Jean-Est selon les superficies exploitées au cours des années 2001 et 2006  
Source : Statistique Canada, 2006, 2008

En 2000, pour le Lac-St-Jean-Est, les montants versés à la main-d'œuvre familiale étaient supérieurs à ceux déboursés pour la main-d'œuvre non familiale. Cette situation n'était plus la même pour l'année 2005 au cours de laquelle de plus forts montants allaient à la rémunération du type de travail non familial (Statistique Canada, 2008). Entre 2001 et 2006, les fermes agricoles de la MRC du Lac-St-Jean-Est ont pu augmenter leur capital agricole. La valeur de celui-ci est passée de 225 millions de dollars canadiens à 288 millions de dollars canadiens entre 2001 et 2006 (Statistique Canada, 2008). De façon générale, les fermes agricoles de la Montérégie-Ouest possèdent un capital agricole supérieur à celles du Lac-St-Jean-Est.

## **Chapitre 3.       SYNTHÈSE DU CONCEPT DE VULNERABILITE**

Le concept de vulnérabilité provient essentiellement des sciences sociales (Luers et al., 2003; Alwang et al., 2001; Mendis et al., 2003). Les sociologues ont été parmi les premiers à utiliser ce concept. Celui-ci a vu le jour à la suite de l'insatisfaction des sociologues sur la façon dont les économistes caractérisaient la pauvreté. Ces derniers se basaient strictement sur le revenu, paramètre relativement facile à mesurer ou à estimer, afin de statuer sur la position et la situation d'une famille ou d'un individu par rapport à un seuil de pauvreté largement accepté dans un contexte donné.

L'insatisfaction des sociologues était basée sur le fait que la pauvreté est un état résultant de la combinaison de plusieurs facteurs et qu'il était difficile de l'apprécier à l'aide d'un seul paramètre (Alwang et al., 2001). Ce constat les a amenés à adopter le concept de vulnérabilité qu'ils estimaient être plus intégrateur ou inclusif (Polsky et al., 2007) et par conséquent plus apte à prendre en compte les multiples dimensions de la pauvreté. Si les sciences sociales ont été à l'origine du concept, en matière de composantes et d'approches, il est toutefois admis que la notion de vulnérabilité aux variabilités et changements climatiques a été grandement influencée par d'autres domaines de recherche. Parmi ceux-ci, on peut citer les études qui touchent les catastrophes et risques naturels, l'économie politique, l'écologie politique et la résilience écologique (Eakin et Luers, 2006; Adger, 1996; Brooks, 2003).

### **3.1 Origines des études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques**

#### **3.1.1 Risques et catastrophes naturels**

Les études qui portent sur les risques et les catastrophes naturels accordent généralement une place importante à la notion de vulnérabilité. Elles cherchent à apprécier cette notion à travers l'évaluation des conséquences néfastes issues d'un événement déterminé. Plus précisément, elles s'efforcent d'apporter des réponses aux questions

suivantes : a) qui est vulnérable à quoi? b) la nature et l'ampleur des conséquences c) le moment et le lieu de vulnérabilité (Eakin et Luers, 2006 ; Wilhelmi et Wilhite, 2002). Ces études, bien qu'elles considèrent que les impacts ou conséquences négatifs enregistrés dépendent non seulement des facteurs biophysiques, mais également d'un potentiel de perte, accordent néanmoins une certaine priorité aux aspects biophysiques. Les questions auxquelles essaient de répondre ces études montrent clairement leur orientation biophysique. Elles partent généralement d'une cause biophysique unique (la sécheresse, par exemple) pour en estimer les différents impacts ou conséquences négatifs ainsi que les mesures d'atténuation à envisager (Kelly et Adger, 2000). L'approche utilisée pour ces études a alimenté dans une grande mesure les méthodologies adoptées dans les études d'impacts, particulièrement celles qui s'intéressent aux impacts des variabilités et changements climatiques sur l'agriculture.

Compte tenu du niveau de dépendance du secteur agricole au climat, plusieurs études (Singh et al., 1998; Thomson et al., 2005; Mall et al., 2006; Luo et al., 2005; Hitz et Smith, 2004 ; Long et al., 2006; Richter et Semenov, 2005; Rosenzweig et al., 1994; Smit et al., 1988) ont cherché à identifier la direction et l'ampleur des changements dans le développement ou le rendement des cultures et dans les systèmes agroalimentaires qui pourraient résulter des modifications des conditions de production, notamment les conditions climatiques. Si l'ensemble de ces études cherche à fournir des informations sur les impacts des changements climatiques sur l'agriculture et, à un degré moindre, sur les mesures d'adaptation à considérer, elles sont toutefois différentes sur plusieurs points de vue. Ces différences se situent surtout au niveau des scénarios climatiques considérés, de l'espace géographique couvert, des attributs du secteur agroalimentaire étudiés et surtout des approches utilisées (Smit et al., 1988). Ces dernières représentent les différences fondamentales entre les diverses études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture. Comme indiqué au tableau 11, ces approches peuvent être groupées en trois

grandes classes : *Analyses de rendement des cultures*, *Analyses spatiales* et *Analyses du système agricole*. Ces approches s'intéressent à des aspects particuliers du secteur agricole et utilisent des méthodes différentes. Parmi celles-ci, l'approche d'analyses de rendement des cultures est la plus utilisée. Par conséquent, il s'est avéré important de fournir, dans cette thèse, de plus amples détails sur ses principales caractéristiques.

Tableau 11. Approches utilisées dans les études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture

| <b>Approche</b>              | <b>Variable principale</b>   | <b>Méthodes</b>  |
|------------------------------|--|--|
| Analyses de rendement        | productivité ou rendement<br>des cultures                              | Opinion des Experts<br>Modèles de productivité<br>des cultures       |
| Analyses spatiales           | étendue et répartition<br>spatiales des terres agricoles               | Analogues spatiaux<br>Mouvement des zones<br>d'agriculture marginale |
| Analyses du système agricole | activités agricoles et<br>fonctionnement du secteur<br>agroalimentaire | Analogues historiques<br>Modèles mathématiques                       |

L'approche d'*analyses de rendement des cultures* peut être opérationnalisée en utilisant des méthodes empiriques ou des modèles dynamiques ou « mécanistiques » qui simulent les rendements des plantes. À l'aide de méthodes empiriques, cette approche consiste principalement en la mise en relation de paramètres biophysiques et climatiques avec les données de rendement. Les différentes étapes couramment suivies dans les études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture basées sur les méthodes statistiques sont présentées à la figure 5. Le point de départ de cette approche est la détermination d'une

période de référence et d'une ou plusieurs périodes futures. Il n'existe pas de règle unique pour le choix de la période de référence. Toutefois, la disponibilité de données pertinentes constitue un critère déterminant dans le processus de sélection de la période de référence. Le choix de celle-ci et des périodes futures est, dans la plupart des cas, suivi d'identification et d'estimation de certains indicateurs agroclimatiques clés pour les périodes retenues (Bootsma et al., 2005; Bootsma et al., 2001; Bootsma et al., 1999; CRAAQ, 2002). Ensuite, les données de rendement des cultures pour la période de référence sont mises en relation avec les valeurs des différents indicateurs agroclimatiques clés pour la même période. Cette étape se fait souvent à l'aide d'analyses de régression simple ou multiple qui mènent généralement à une équation où le rendement pour les périodes futures, variable dépendante, peut être estimé à l'aide des valeurs connues des indicateurs agroclimatiques futurs, variables indépendantes. Puis, on procède à une comparaison des séries de données sur le rendement pour les différentes périodes afin d'identifier la direction et l'ampleur des impacts potentiels des changements climatiques sur les cultures. Finalement, en utilisant différentes approches ou techniques, on propose certaines activités ou stratégies d'ajustement, généralement d'ordre technique ou technologique, à ces éventuels changements ou impacts. Cette dernière étape n'est pas toujours réalisée. Des fois, il revient à une autre équipe de se pencher sur les réponses à apporter aux impacts anticipés des variabilités et changements climatiques sur le rendement des cultures.

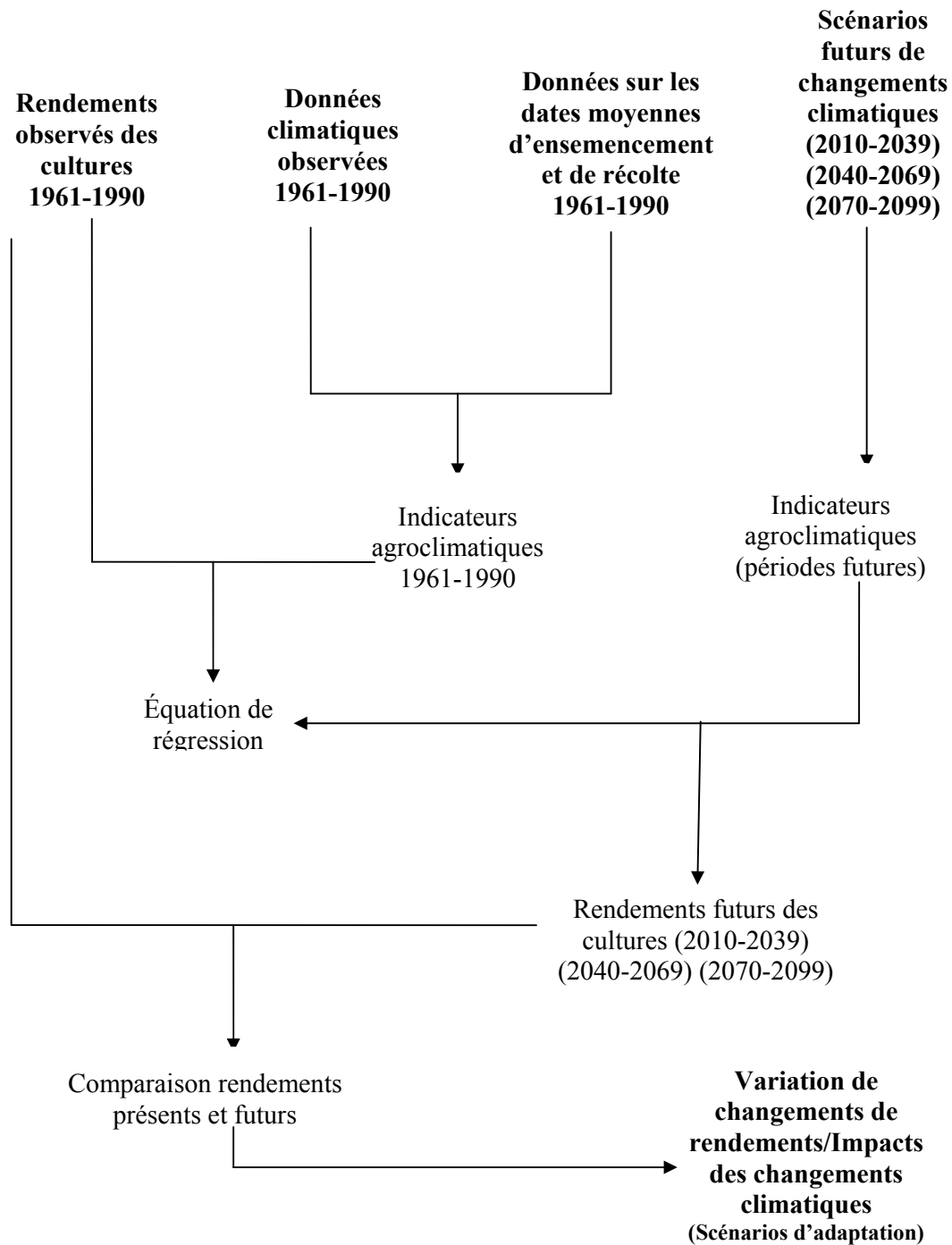


Figure 5. Démarche méthodologique des études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture avec les modèles statistiques

Moyennant la maîtrise de techniques statistiques appropriées, la disponibilité d'une bonne série de données sur les rendements agricoles et de certains paramètres biophysiques et climatiques clés, cette méthode décrite précédemment est relativement facile à utiliser. Néanmoins, elle ne fournit qu'une description statique de la relation qui existe entre les rendements des cultures et les conditions environnementales pour un site particulier et ne renseigne nullement sur les mécanismes ou les processus biophysiques qui ont conduit à cette relation (Poluektov et Topaj, 2001 ; Thornley et Johnson, 2000). Aucun lien de causalité n'est possible avec cette méthode (Wilby et Dawson, 2007). Les relations définies à partir de cette méthode ne sont pas applicables dans d'autres régions, car leur élaboration est basée sur les conditions spécifiques à un endroit et un temps particuliers. Ceci a amené Poluektov et Topaj (2001, page 654) à avancer, par rapport à l'utilisation de cette méthode dite empirique, que « Toute tentative pour appliquer la relation en dehors des conditions pour lesquelles elle a été développée et testée n'est pas une simulation, mais plutôt une spéculation ». Par ailleurs, l'adoption d'une telle méthode peut impliquer la réalisation d'expériences spécifiques afin d'arriver à établir, pour chaque cas, une équation de régression définissant les relations existant entre le rendement et les variables indépendantes. Par conséquent, cette méthode peut se révéler exigeante en temps et main-d'œuvre (Jones et al., 2003; Poluektov et Topaj, 2001). En effet, cette méthode statistique permet, de préférence, de développer des outils spécialisés et adaptés à un environnement spécifique uniquement (Teh, 2006).

Les principales limites de cette méthode ont justifié le développement d'alternatives qui sont relativement moins exigeantes tant en termes de temps qu'en main-d'œuvre, indépendantes des lieux (dans une moindre mesure) et qui cherchent surtout les explications des mécanismes et la compréhension des réponses des cultures selon les conditions de production (Thornley et Johnson, 2000). Ces alternatives aux méthodes empiriques ou



statistiques sont représentées par les modèles dynamiques de culture ou les modèles basés sur les processus biophysiques des plantes (Teh, 2006, Thornley et Johnson, 2000)

Les différentes étapes de la méthode d'analyse de rendement des cultures basée sur les modèles dynamiques sont présentées à la figure 6. Elles comprennent :

- a) L'analyse des données des conditions climatiques pour une période de référence
- b) L'analyse des données climatiques pour une ou plusieurs périodes futures
- c) L'intégration des paramètres climatiques appropriés dans des modèles de croissance ou de rendement des cultures pour les deux périodes en question
- d) La comparaison des rendements observés ou simulés du climat de référence avec ceux du climat futur
- e) L'estimation du degré de changement dans le rendement des cultures, et finalement
- f) L'élaboration de stratégies ou d'activités d'adaptations

Bien qu'elle soit la plus utilisée, l'approche basée sur l'analyse des rendements de culture contient toutefois des limitations majeures. Des incertitudes persistent sur l'envergure des effets bénéfiques d'un environnement riche en CO<sub>2</sub> en présence d'autres facteurs limitants pour la croissance des plantes (Long et al., 2006). Les scénarios climatiques devraient s'efforcer d'améliorer la fiabilité et la précision des données de précipitations issues des différents modèles de circulation générale (Bazzaz et Sombroek, 1996). Il y a également lieu de chercher à intégrer dans les modèles de culture les impacts des variations climatiques sur les ravageurs, les maladies et la qualité des sols (André et Bryant, 2001), à augmenter le domaine de validité des modèles de culture pour une plus grande applicabilité et à considérer certains scénarios de pratiques culturelles plutôt que de continuer à considérer le scénario de l'« agriculteur réfractaire aux changements ».

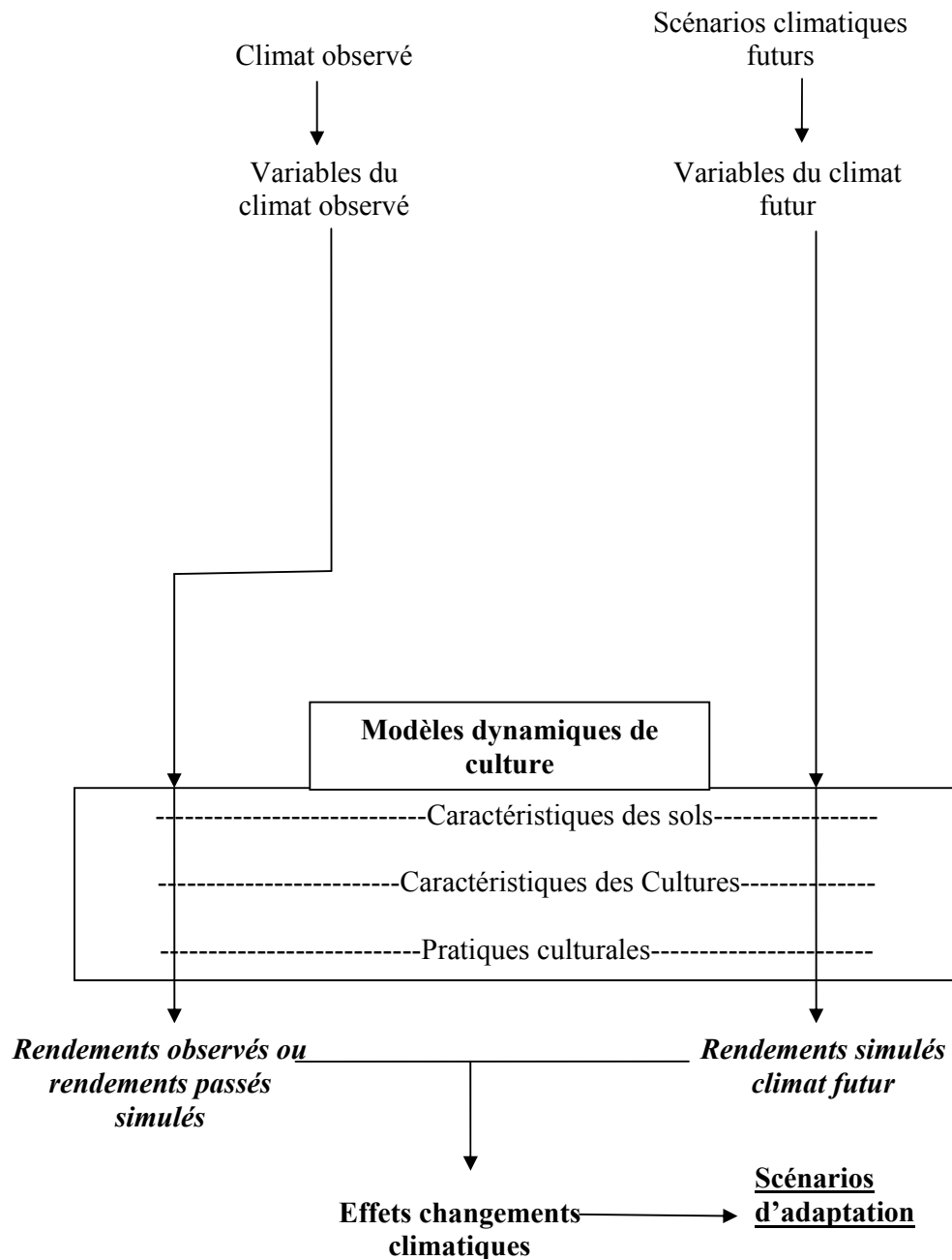


Figure 6. Schéma résumé des étapes de l'approche des analyses de rendement à partir des modèles de culture (adapté d'André et Bryant, 2001)

À ce sujet, les différentes études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture réalisées au Canada et plus particulièrement au Québec (Singh et al., 1998; Singh et Stewart, 1991; El Maayar, 1999; Brassard et Singh, 2008; Bourgeois et Gagnon 2001) ont considéré

l'approche de l'« agriculteur réfractaire aux changements ». Bien qu'elles aient toujours essayé de tenir compte des derniers progrès effectués au niveau de la résolution spatiale des scénarios climatiques, l'adoption de l'approche de l'« agriculteur réfractaire aux changements » a toujours porté préjudice à la validité des impacts anticipés sur les niveaux de rendements. À la fois réductrice et simpliste, cette approche ne permet pas de se faire une idée plus vaste des différents niveaux de rendements possibles. En outre, elle peut conduire à une surestimation des impacts négatifs anticipés (Schneider et al., 2000; Polsky, 2004).

Avec une telle approche, les producteurs agricoles sont tout simplement considérés comme des agents passifs et complètement déconnectés de leurs réalités biophysiques de production. Si la plupart des modèles de culture offrent la possibilité de modifier ou d'ajuster, selon les besoins certains de leurs paramètres d'entrée, notamment les caractéristiques des cultivars, il est donc inacceptable qu'on continue à se contenter de l'utilisation de l'approche de l'« agriculteur réfractaire aux changements » dans les exercices de simulations de rendements agricoles. Par ailleurs, la majorité des études réalisées sur la question au Québec considère généralement le même cultivar pour toutes les régions agricoles du Québec. Cette façon de procéder ne correspond non plus à la réalité (les conditions de production, notamment les conditions climatiques varient d'une région agricole à l'autre) et contribue également à compromettre la validité de certains des impacts anticipés des changements climatiques sur les rendements agricoles.

Une autre limitation de cette approche basée sur les modèles dynamiques ou mécanistiques est le fait de considérer le rendement ou les paramètres biophysiques de la production agricole comme étant un élément isolé qui n'entretient que des interactions peu significatives avec les autres éléments de ce système humain. Autrement dit, l'agent humain est quasi absent dans cette approche et plus particulièrement dans le processus de définition des stratégies de réponse. Il est évident que le secteur agricole est composé de différents

éléments qui possèdent des relations très étroites et souvent non linéaires entre eux (Adger et al., 2005). À la suite de ce constat, un changement de direction ou d'approche, du point de vue théorique tout au moins, a été conseillé ou effectué dans les études qui touchent les conséquences et les adaptations de l'agriculture aux changements climatiques. Une certaine tendance vers des études de vulnérabilité aux variabilités et changements climatiques plutôt que de simples études d'impacts a été constatée depuis quelques années (Schröter et al., 2005; Parry, 2001; Liverman, 1990; Downing, 1991; Turner et al., 2003). Mis à part les domaines des catastrophes ou risques naturels et des études d'impacts, d'autres disciplines ont servi à alimenter les approches utilisées dans les études de vulnérabilité de l'agriculture aux variabilités et changements climatiques.

### **3.1.2 Économie et écologie politiques**

Voulant apporter une réponse à l'orientation biophysique ou des études de risques et de catastrophes naturels, l'utilisation du concept de vulnérabilité a connu une certaine évolution dans les domaines d'économie et d'écologie politiques. Contrairement aux études de risques et catastrophes naturels, elles s'intéressent surtout aux processus socio-économiques qui expliquent le niveau d'impacts enregistrés et la variation dans les capacités de réponse (Eakin et Luers, 2006).

Si l'économie politique est plus orientée vers les dynamiques sociales, l'écologie politique, par contre, cherche à considérer de façon égale les processus biophysiques et les réalités socio-économiques dans l'explication des impacts ou capacités de réponse variables d'un contexte à l'autre (Adger et al., 2001). Toutefois, l'absence de liens formels ou clairement établis entre les différents facteurs socio-économiques et la susceptibilité aux effets néfastes est souvent reprochée à ces deux disciplines. L'établissement de liens entre les multiples facteurs pouvant expliquer les différences au niveau de la vulnérabilité implique une

approche plus globale dans laquelle les différents facteurs sont considérés comme les éléments interdépendants d'un même système. Ceci nous amène à présenter l'un des concepts qui a grandement contribué aux récents débats sur la notion de vulnérabilité (Eakin et Luers, 2006).

### **3.3.3 Résilience écologique**

Le concept de « résilience écologique » a été introduit par Holling (1973). À travers ce concept, celui-ci cherchait à décrire les modèles de changement dans la structure et le fonctionnement des systèmes écologiques (Walker, 2006). Depuis son introduction, ce concept a grandement évolué et intègre actuellement les aspects relatifs à la compréhension, la gestion et la gouvernance des systèmes socio-écologiques (Folke et al., 2004) ainsi que les changements d'état écologiques résultant d'activités anthropiques dans une gamme variée d'écosystèmes (Gunderson et Pritchard, 2002).

Il n'existe pas de définition unique de « résilience écologique ». Toutefois, ce concept se réfère généralement à la capacité d'un système de maintenir les mêmes relations indispensables à son fonctionnement normal tout en étant soumis à certaines perturbations ou fait tout simplement référence à la vitesse à laquelle un système se remet de certaines perturbations (Holling, 1973; Adger, 2000). Celles-ci peuvent être de nature sociale, politique et environnementale. Le fonctionnement normal du système réfère à une quelconque condition bien définie qui peut être reconnue si elle se présente de nouveau (Gallopín, 2006).

À travers ce concept de « résilience écologique », la notion de vulnérabilité est perçue comme une caractéristique dynamique d'un système dans lequel les humains sont en constante interaction avec leur environnement biophysique (Eakin et Luers, 2006). Autrement dit, toute appréciation de la vulnérabilité d'un système déterminé doit prendre en compte les actions conjuguées ou les relations existant entre ses éléments socio-économiques et

biophysiques. Les définitions du concept de résilience écologique sous-entendent, entre autres, la prise en considération d'un seuil permettant de statuer sur le fonctionnement normal d'un système. Cet aspect relatif à un seuil de bon fonctionnement pour les systèmes naturel et humain est largement utilisé dans les récentes études de vulnérabilité sur les changements climatiques (Luers et al., 2003, Polsky et al., 2007). En effet, le concept de « résilience écologique » est, à certains égards, lié à certaines composantes de la notion de vulnérabilité, notamment celles relatives à la capacité adaptative et à la sensibilité dans une moindre mesure (Gallopín, 2006).

### **3.2 Vulnérabilité : définition et composantes**

Dans le domaine des implications des changements climatiques sur les systèmes humains, il existe des nuances très subtiles dans les définitions du concept de vulnérabilité. Ces nuances varient selon la position accordée (point de départ, point central, point final) au processus d'évaluation de la vulnérabilité d'un système aux variabilités et changements climatiques (Kelly et Adger, 2000). Toutefois, celles-ci rejoignent un peu la définition du GIEC (2001, page 96) qui veut que la vulnérabilité soit considérée comme « une mesure dans laquelle un système est sensible ou incapable de faire face aux effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes ». Cette définition du concept de vulnérabilité fournie par le GIEC est assez claire. Elle indique de façon précise la variable à mesurer, en l'occurrence le ou les états défavorables. Néanmoins, il y a lieu de mentionner deux choses. D'une part, cette définition ne considère pas de façon explicite les autres sources de pression qui se font généralement sentir simultanément avec celles d'ordre climatique. D'autre part en s'arrêtant sur la partie « système sensible », elle peut créer des confusions avec l'une de ses composantes (sensibilité) qui sera abordée plus tard; cette confusion peut pousser plus d'un à parler

indifféremment de la sensibilité d'un système et de sa vulnérabilité. Il est clair que la vulnérabilité est un concept beaucoup plus large que celui de sensibilité et qu'il n'est pas approprié de les utiliser indistinctement. Ceci nous amène à considérer celle de Polsky et al., (2003, page 2) où : « la vulnérabilité aux changements climatiques est la susceptibilité qu'un système spécifique couplé homme-environnement subisse des dommages à la suite d'une exposition à certains stimuli associés aux altérations des sociétés et de la biosphère effectuées dans le but de s'ajuster ». Bien que relativement longue, cette définition intègre tant les facteurs de pression d'ordre climatique que non climatique. En outre, elle insiste sur l'étroite relation qui existe entre les humains et les facteurs biophysiques des différents systèmes humains.

Il existe un large consensus (Turner et al., 2003; Vázquez-León et al., 2003; O'Brien et al., 2004; Luers et al., 2003) sur les facteurs susceptibles d'influencer la vulnérabilité des systèmes humains, notamment l'agriculture, aux changements climatiques. Ce consensus est établi autour des composantes de vulnérabilité identifiées par l'IPCC (2001b). Ce dernier présente la vulnérabilité aux changements climatiques comme étant « fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité adaptative » IPCC (2001b, page 995).

L'*exposition* du système consiste à dresser un portrait des conditions biophysiques et surtout climatiques (changements à long terme, modifications dans la variabilité climatique et dans l'occurrence et l'ampleur des événements extrêmes) qui prévalent dans le système étudié. Une fois que l'échelle spatiale, l'horizon futur et les objectifs à atteindre ont été déterminés, l'une des premières étapes des études de vulnérabilité est d'élaborer des scénarios climatiques futurs. Plusieurs approches ou méthodes peuvent être employées lors de l'élaboration des scénarios climatiques, soit : (1) scénarios par incrémentation, (2) scénarios basés sur des analogies spatiales, temporelles et (3) scénarios combinant les sorties des

Modèles de Circulation générale (MCG) et les données observées. Cette dernière méthode d'élaboration des scénarios climatiques est la plus commune (Mearns et Hulme, 2001).

Dans l'évaluation de cette composante de vulnérabilité, il y a une tendance générale à la considérer comme une composante strictement physique. McLeman (2005), en remplaçant le concept d'exposition par « risque », n'est pas de cet avis. Selon lui, il existe non seulement un risque physique, mais également un risque moral où un individu peut décider, malgré les informations pertinentes à sa disposition, de s'installer dans une zone marginale ou à haut risque par rapport à un ensemble de variables climatiques données. En outre, avec la reconnaissance de l'existence d'autres sources de pression auxquelles devront faire face les différents systèmes humains, notamment le secteur agricole, il y a une certaine tendance dans les récentes études à dresser également un portrait des conditions socio-économiques qui caractérisent le système à l'étude. Des approches probabilistes ou empiriques et l'emploi de scénarios sont couramment utilisés pour apprécier cette composante.

La *sensibilité* est définie comme étant le degré auquel un système ou un de ses éléments est affecté négativement ou positivement par des facteurs d'ordre climatique ou non climatique. À titre d'exemple, en considérant l'exposition d'une culture à des variations de température et des périodes de sécheresse, sa sensibilité serait évaluée en appréciant et en comparant son niveau de rendement à une référence déterminée. Si, suite aux changements, le rendement diminue par rapport à la référence, on conclura que cette culture est négativement sensible aux changements climatiques, dans le cas contraire, sa sensibilité sera positive. Une autre façon d'apprécier la sensibilité d'un élément ou d'un système est de comparer la valeur de son coefficient de variation à celle d'un autre élément ou système ayant subi les mêmes types de pression. L'épithète « élevée », « faible » ou « moyenne » attribuée à la composante sensibilité dépend généralement de l'amplitude du changement opéré dans le système ou dans l'un de ses éléments considérés.



La *capacité adaptative* est perçue comme « la capacité d'un système de s'adapter aux changements climatiques (notamment à la variabilité du climat et aux phénomènes extrêmes), de façon à atténuer les dommages potentiels, à tirer le meilleur parti des possibilités offertes et à faire face aux conséquences » (GIEC, 2001, page 83). Cette définition serait plus complète si on y ajoutait également les sources de pression d'ordre non climatique, car le système s'adapte à la fois à des sources de pression multiples. Cette composante très importante du concept de vulnérabilité est toutefois la plus difficile à mesurer (Tschakert, 2007). La difficulté de mesurer cette composante est inhérente à la nature de certains facteurs qui la déterminent. Cet aspect est abordé dans la partie qui traite de la quantification du concept de vulnérabilité. De même que la composante d'exposition future d'un système aux changements climatiques, la détermination de la capacité adaptative future doit également impliquer des processus d'élaboration de scénarios. Toutefois, ces processus sont très rarement effectués dans les études de vulnérabilité aux variabilités et changements climatiques. Ainsi, c'est surtout la vulnérabilité actuelle aux changements climatiques futurs qui est généralement évaluée.

Malgré ce large consensus autour des composantes du concept de vulnérabilité, il importe toutefois de souligner l'existence d'un courant de pensée un peu particulier. En se basant un peu sur la logique de Blaikie et al. (1994), Kelly et Adger (2000) ont proposé une nouvelle approche relative aux composantes du concept de vulnérabilité. Appelée « l'approche du soldat blessé » (« wounded soldier approach ») par ces derniers, ce courant de pensée avance que la vulnérabilité n'a en fait qu'une seule composante : *c'est la capacité adaptative du système*. Leur compréhension de ce concept les a amenés à parler de vulnérabilité sociale d'un système. En guise d'explication à leur point de vue, ils ont avancé qu'il est clair que la notion de vulnérabilité doit toujours être liée à un risque ou une source de pression quelconque et que la vulnérabilité qu'on veut mesurer n'est fonction que de la capacité ou

l'incapacité d'un système déterminé de faire face ou de répondre aux différents facteurs qui exercent des pressions sur leur bien-être. En ce sens, dans leur approche, ils accordent plus d'importance au contexte sociopolitique dans lequel évolue le système. D'après Kelly et Adger (2000), le contexte permettra de bien comprendre les facteurs qui influencent la vulnérabilité non seulement aux conditions climatiques, mais également à d'autres formes de pression environnementale et sociétale. Cette façon de voir le concept de vulnérabilité s'apparente un peu à l'approche de vulnérabilité pratiquée par les chercheurs dans le domaine de l'économie politique.

### **3.3 Quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques**

Le nombre d'études qui touchent directement ou indirectement la question relative à la quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques a connu une certaine augmentation au cours des dernières années (O'Brien et al., 2004; Vázquez-León et al., 2003; Luers et al., 2003; Luers, 2005; Hareau et al., 1999; Liverman, 1999; Wilhelmi et Wilhite, 2002). La majorité de ces études cherchent généralement à fournir des informations susceptibles d'aider dans les processus d'élaboration des stratégies de réponses aux risques associés aux variabilités et changements climatiques (Füssel et Klein, 2006). Néanmoins, elles peuvent être également réalisées afin de favoriser une meilleure allocation des ressources. Comme le montre le tableau 12, ces études sont réalisées suivant deux principaux cadres conceptuels : le cadre conceptuel de « IPCC 2001 » et celui basé sur les éléments de la chaîne de risque.

Le premier cadre conceptuel est essentiellement caractérisé par une combinaison des indicateurs d'exposition, de sensibilité et de capacité adaptative du système étudié. Cette combinaison est basée sur l'influence respective des composantes. La vulnérabilité est une fonction positive de l'exposition et de la sensibilité, tandis qu'elle est une fonction négative

de la capacité adaptative (Smit et Pilifosova, 2003, Polsky et al., 2007). Autrement dit, la vulnérabilité varie dans le même sens que l'exposition et la sensibilité, mais varie dans le sens contraire de la capacité adaptative. Les études réalisées selon ce cadre conceptuel sont généralement constituées des étapes suivantes :

1) Développement d'indicateur (s) d'exposition

- a) identification des sources de pression,
- b) identification des systèmes ou groupes exposés,

2) Développement d'indicateur (s) de sensibilité

- a) identification d'un seuil critique,
- b) état du système sous les conditions d'exposition retenues,
- c) mise en relation de l'état identifié au point (b) de (2) avec le seuil critique,
- ou
- d) calcul de coefficients de variation.

3) Développement d'indicateurs de capacité adaptative ou d'adaptation

- a) identification de déterminants de capacité adaptative,
- b) Pondération et priorisation des déterminants retenus.

Les indicateurs développés pour les trois composantes, en l'occurrence l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative sont ensuite combinés afin de présenter des indicateurs de vulnérabilité aux changements et variabilités climatiques.

Tableau 12. Principaux cadres conceptuels utilisés dans la quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques

| Cadre conceptuel  | Caractéristiques  |
|---|---|
| « IPCC 2001 »   | Évaluation séparée et combinaison des composantes de vulnérabilité, en l'occurrence l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative                                    |
| Chaîne de risques (risque (s) - effets ou conséquences néfastes - réponses) | Le processus part des conséquences néfastes enregistrées dans le système et aboutit à un indicateur unique de vulnérabilité issu de la combinaison de différents indicateurs. |

Le *cadre conceptuel de l'IPCC* pour les études de vulnérabilité définit assez bien les composantes à considérer. Néanmoins, il est important de signaler que la relation fonctionnelle entre les différentes composantes du concept de vulnérabilité n'est pas clairement indiquée dans ce cadre. Ceci, pouvant être perçu comme l'une de ses faiblesses, semble favoriser plutôt de multiples interprétations permettant de s'ajuster à différents contextes et de prendre également en compte la complexité du concept à évaluer. En d'autres termes, le cadre conceptuel de l'IPCC offre un cadre général qui peut être opérationnalisé selon le contexte dans lequel l'étude est menée. Ses principales limitations, abordées plus loin, découlent par conséquent des applications qu'on en fait.

Le *second cadre conceptuel* cherche à quantifier la vulnérabilité en commençant par considérer le deuxième élément de la chaîne de risques, en l'occurrence les conséquences néfastes qu'un facteur ou un groupe de facteurs de pression a eu sur un système déterminé. Cette approche met en relation les effets indésirables (par exemple, baisse de rendement

agricole, baisse de revenu, diminution des superficies d'une culture déterminée et dommages matériels) avec certaines variables biophysiques, socio-économiques et technologiques choisis selon diverses méthodes. Les variables qui sont mieux corrélées sont ensuite pondérées d'après diverses méthodes (par exemple, enquêtes et groupes de discussion). Une combinaison des variables pondérées conduit à un indicateur de vulnérabilité (Moss et al., 2002). Ce cadre conceptuel, moyennant la disponibilité des données pertinentes, est relativement facile à opérationnaliser. Toutefois, il est important de signaler qu'un tel cadre permet généralement d'évaluer la vulnérabilité ex post. Son utilisation dans des études de vulnérabilité future ou appréhendée est plutôt difficile à appliquer.

Le cadre conceptuel utilisé peut être considéré comme le principal critère de différenciation des études visant la quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques. Cependant à l'intérieur de chaque cadre conceptuel, d'autres éléments permettent également d'effectuer un autre niveau de différenciation de ces études. Comme le montre le tableau 13, ces éléments de différenciation sont :

a) Le nombre de facteurs ou de sources de pressions utilisé : Les premières études de quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques considéraient généralement un seul facteur ou source de pression, celui-ci était surtout représenté par les facteurs de pression d'ordre climatique (Leichenko et O'Brien, 2002). Récemment, il y a une tendance à considérer également plusieurs sources de pression représentant également les facteurs d'ordre non climatique prenant en compte le contexte socio-économique dans lequel évolue le système étudié (O'Brien et al., 2004).

b) L'espace géographique et échelle temporelle : On trouve des études de quantification de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques à toutes les échelles spatiales (internationale, nationale, régionale et locale) et temporelles (Belliveau et al., 2006; O'Brien et al., 2004; Luers et al., 2003; Wilhelmi and Wilhite, 2002). Il n'y a pas vraiment de standard à

ce niveau. Contrairement aux études internationales et nationales, celles effectuées au niveau régional ou local sont relativement rares (Laidler et al., 2009; Belliveau et al., 2006; Vàsquez-Leòn et al., 2003; Luers et al., 2003).

c) *L'approche utilisée* : Une approche comparative ou « isolée » peut être adoptée dans les études de quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques. Dans l'approche comparative, ces études peuvent être réalisées pour un type d'agriculture déterminée ou un sous-secteur agricole dans au moins deux régions géographiques distinctes possédant des conditions socio-économiques différentes, mais très semblables en termes de conditions biophysiques (Vàsquez-Leòn et al., 2003). Ces études peuvent considérer soit des régions géographiques situées de part et d'autre d'une frontière séparant deux pays, soit deux régions agricoles d'un même pays. Dans l'approche « isolée », on considère généralement un seul système agricole. À ce niveau-là, il n'y a généralement pas de comparaison et s'il en existe c'est surtout à l'échelle des différentes unités du même système.

Selon le déroulement du processus d'évaluation de la vulnérabilité du secteur agricole, on distingue également l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up » ou une combinaison des deux qui peut être qualifiée d'approche mixte ou hybride. L'approche « top-down » part généralement des chercheurs ou des acteurs externes au secteur à l'étude et se termine par la consultation des acteurs faisant partie du secteur considéré. L'approche « bottom-up » est tout à fait le contraire de la précédente (Belliveau et al., 2006). Le déroulement du processus est, entre autres, très important dans l'identification de biais pouvant avoir une influence considérable sur les valeurs des indicateurs de vulnérabilité.

Tableau 13. Critères supplémentaires de différenciation des études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques

| Critères                                  | Cas possibles  |
|---|--|
| Nombre de facteurs de pression            | Un seul facteur ou source de pression<br>Sources de pressions multiples (« double ou multiple exposition »)                        |
| Espace géographique et échelle temporelle | International, national, régional ou local<br>Sur une année ou sur plusieurs années<br>Pour une période passée, courante ou future |
| Approche utilisée                         | Considération d'un seul système agricole<br>Comparaison de deux systèmes agricoles<br>« Top-down » ou « bottom-up »                |
| Méthode                                   | Basée sur l'opinion des experts<br>Empirique<br>Analytique   |
| Format des résultats                      | Indicateur unique<br>Représentation cartographique   |

d) *Méthode* : Certaines études ont été réalisées en se basant sur l'opinion des experts, en adoptant une démarche empirique ou analytique. Celles basées sur l'opinion des experts font appel aux différentes connaissances de ces derniers pour l'identification des déterminants de chaque composante de vulnérabilité et leur influence dans la détermination de celle-ci (O'Brien, 2004). Les études utilisant les méthodes empiriques procèdent généralement à une analyse de régression entre les effets néfastes d'une ou plusieurs sources de pression et plusieurs variables biophysiques et socio-économiques pour la présentation d'indicateur de vulnérabilité. Les méthodes analytiques sont principalement basées sur l'utilisation de fonctions ou formules mathématiques résumant la notion de vulnérabilité (Luers et al., 2003).

e) Le format des résultats : La quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques peut se présenter à l'aide d'une valeur unique ou sous forme de cartes (O'Brien, 2004). Pour celles-ci, les valeurs retrouvées dans le support cartographique sont généralement présentées sous forme qualitative afin d'en faciliter la lecture.

Les diverses études touchant la quantification de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques ont certainement contribué à enrichir les méthodes pouvant être utilisées à cette fin. Elles sont arrivées presque unanimement à adopter une définition du concept de vulnérabilité, à reconnaître ses racines et à tenir compte, dans une certaine mesure, des spécificités des contextes des cas étudiés. Toutefois, certaines lacunes importantes méritent d'être mentionnées. Celles-ci touchent à la fois les aspects liés à l'opérationnalisation des cadres conceptuels et les scénarios considérés. Par rapport à l'opérationnalisation des cadres conceptuels, les points suivants sont à signaler :

- a) L'identification des sources de pression suscite encore beaucoup de controverses. Dans l'approche « top-down », c'est surtout les acteurs externes au système considéré qui déterminent généralement les facteurs de pression (Luers et al., 2003; O'Brien et al., 2004). Pour ce faire, ils se basent généralement sur leurs expériences ou connaissances du système à l'étude. Les facteurs de pression considérés ne sont pas forcément ceux jugés les plus importants par les principaux concernés. Cette situation risque d'entraver, à certains égards, le processus d'application des stratégies d'adaptations proposées par l'étude de vulnérabilité, car les communautés du secteur agricole concerné, n'ayant pas les mêmes perceptions des facteurs de pression que les acteurs externes au système, peuvent tout simplement refuser de s'approprier de ces stratégies. Cette même explication est également valable pour le choix des déterminants de la composante de capacité adaptative qui influence aussi



l'évaluation de la vulnérabilité et le processus d'élaboration de stratégies d'adaptation. Pour favoriser une appropriation des stratégies d'adaptation, il est souhaitable que le choix des facteurs de pression et des déterminants de capacité adaptative tienne non seulement compte du contexte dans lequel évolue le secteur agricole en question, mais aussi de leur importance et pertinence pour les communautés concernées. Tout ceci implique de considérer, avec un niveau de discernement élevé, les aspects touchant la pondération des déterminants de la composante de capacité adaptative. Ces aspects sont relativement plus faciles à gérer dans une approche « bottom-up » que dans une approche « top-down » (Belliveau et al., 2006).

- b) La notion d'échelle spatiale est très importante dans les études de vulnérabilité. Il y a une tendance générale à mener des études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques à des échelles spatiales relativement grossières (internationales, nationales et régionales). De telles échelles, si elles permettent de dresser un portrait général du niveau de vulnérabilité, dissimulent toutefois les spécificités importantes au niveau local. À titre d'exemple, O'Brien et al. (2004), en passant d'une échelle régionale à une échelle locale, ont pu mettre en évidence des aspects fondamentaux à la compréhension du niveau de vulnérabilité de certains districts en Inde. Bien qu'il n'y ait pas de formule universelle pour déterminer l'échelle spatiale à considérer dans les études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques, son choix doit être toutefois guidé par l'objectif visé ou l'utilisation finale de l'étude.
- c) De même que l'échelle spatiale, l'horizon concerné par l'étude de vulnérabilité doit être clairement défini. Liverman (1999) a mis cet aspect en exergue en

expliquant la façon dont l'irrigation a permis de réduire la vulnérabilité à la sécheresse à court terme et de contribuer à augmenter la vulnérabilité à ce même facteur de pression à long terme et surtout suite à une période de sécheresse prolongée. Par rapport à ce facteur d'échelle temporelle, il y a également lieu de mentionner que la majorité de ces études évaluent la vulnérabilité actuelle du secteur agricole aux changements climatiques futurs (O'Brien et al., 2004). Ceci s'explique par le fait qu'elles considèrent la sensibilité de certaines variables caractéristiques de l'état du secteur agricole face aux scénarios climatiques futurs, mais en utilisant leur capacité adaptative actuelle. De même que les conditions climatiques, les conditions socio-économiques du secteur vont certainement évoluer. Ceci amène à considérer, pour une appréciation plus plausible de la vulnérabilité future du secteur agricole en question, l'intégration de scénarios futurs de sa capacité adaptative.

- d) La considération d'un seuil de bien-être ou de dommages occupe une place importante dans les récentes études de vulnérabilité du secteur agricole aux changements climatiques. Luers et al. (2003) ont considéré un seuil de rendement au-dessus duquel le bien-être des agriculteurs était garanti. Si l'idée en soi est justifiable, il est toutefois important de signaler certains aspects pouvant restreindre son utilisation : 1) il n'existe pas une perception unique de la notion de bien-être, sa perception varie généralement d'une catégorie d'agriculteurs à une autre, 2) le seuil choisi, compte tenu du fait qu'il doit être basé, entre autres, sur le contexte dans lequel évolue le système d'agriculture à l'étude, ne devrait pas être considéré comme une valeur unique ou une constante, 3) cet aspect de faire varier les valeurs du seuil est encore plus

difficile à considérer dans les études de vulnérabilité future aux changements climatiques à moins qu'une approche basée sur des scénarios soit considérée.

- e) Les épithètes « dynamique et relatif » sont souvent citées comme les principales caractéristiques du concept de vulnérabilité. Toutefois, rares sont les études qui ont cherché à démontrer son évolution à travers le temps pour un secteur agricole déterminé.

En ce qui concerne les aspects beaucoup plus techniques, il y a lieu de souligner les aspects suivants :

- a) Il existe encore des incertitudes majeures dans les scénarios climatiques futurs, particulièrement au niveau de la prédiction des régimes de précipitation et de l'occurrence des événements extrêmes. Ces informations sont susceptibles d'influencer grandement la sensibilité des cultures et par conséquent la quantification ou la mesure de la vulnérabilité (Southworth et al., 2000).
- b) À l'intérieur des modèles de culture, certains aspects fondamentaux du système de production, comme la présence de maladies ou d'insectes et la dégradation des sols susceptibles d'être provoquées par les changements climatiques sont peu ou pas représentés. En outre, des connaissances incomplètes persistent sur les effets d'un environnement riche en CO<sub>2</sub> sur le développement et la croissance des plantes.
- c) La cascade d'incertitudes résultant des différents scénarios et des modèles utilisés est rarement indiquée de façon claire. Ce type d'information est fondamental dans un processus de prises de décisions.

Si l'on retrouve beaucoup de points différents dans les études de vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques, il est néanmoins vrai qu'elles cherchent presque toutes à atteindre un objectif final qui est celui de favoriser un meilleur processus de prise de

décisions. Celles-ci portent généralement sur les adaptations à entreprendre ou les stratégies à envisager en vue de diminuer la vulnérabilité du secteur agricole aux différentes sources de pression. Les études de vulnérabilité, en établissant un modèle causal, sont susceptibles non seulement d'identifier les éléments qui influencent le degré de vulnérabilité d'un système, mais également d'établir le lien entre ceux-ci. L'élaboration d'un tel modèle exige des études plus détaillées et à des échelles relativement petites si l'on veut bien cerner certaines spécificités ou particularités. Celles-ci font, à certains égards, une grande différence dans l'évaluation du degré de vulnérabilité d'un système déterminé et permettent un processus d'élaboration de stratégies d'adaptations plus éclairé et par conséquent mieux adapté.

Cette synthèse a mis en relief l'origine lointaine et la contribution de plusieurs disciplines au concept de vulnérabilité très utilisé de nos jours dans le domaine des variabilités et changements climatiques. En outre, elle a aussi permis de se familiariser avec les composantes principales qui rentrent dans la quantification de ce concept ainsi que les principaux aspects controversés des méthodes de quantification utilisées. Certains de ces aspects ont grandement influencé la démarche méthodologique retenue pour la présente étude.

## Chapitre 4. MÉTHODOLOGIE

Afin de pouvoir statuer sur l'évolution du degré de vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est aux variabilités et changements climatiques, dans un contexte d'autres sources de pression, la démarche méthodologique générale consiste à évaluer ce concept dans le temps (une période de référence, 1985-2005 et une période future, 2010-2039) et pour certaines municipalités situées dans les deux régions agricoles ci-haut mentionnées. Indépendamment de la période et des municipalités considérées, l'évaluation du degré de vulnérabilité a été effectuée en deux étapes principales indiquées à la figure 7. Tout simplement dit, un profil de vulnérabilité aux changements climatiques a été effectué et suivi d'un profil de vulnérabilité aux sources de pression d'ordre socio-économique. La combinaison de ces deux types de profil a permis d'identifier les municipalités présentant une vulnérabilité à plusieurs sources de pression, autrement dit les municipalités qui sont confrontées à une vulnérabilité multiple.

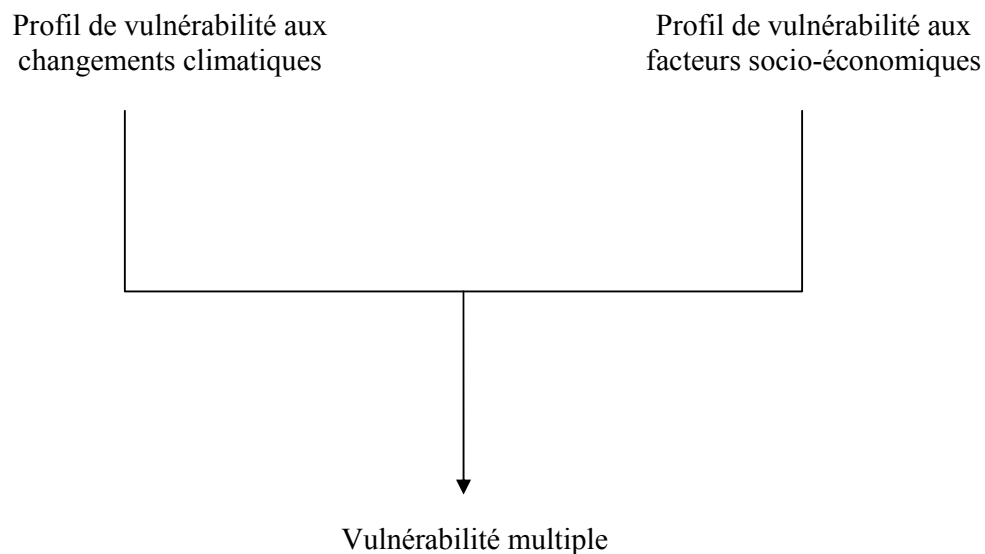


Figure 7. Schéma général de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité multiple

Néanmoins, les approches méthodologiques ou les étapes à effectuer en vue d'évaluer la vulnérabilité au cours de la période de référence (1985-2005) ont été, à certains égards, différentes de celles suivies pour la période future (2010-2039). Par ailleurs, il est également important de signaler que si toutes les municipalités productrices de maïs-grain dans les deux régions agricoles ont été considérées dans l'évaluation de la vulnérabilité de référence, trois d'entre elles dont deux en Montérégie-Ouest et une au Lac-St-Jean-Est ont été considérées dans l'appréciation de la vulnérabilité du secteur aux changements climatiques pour la période future 2010-2039. En vue de faciliter la lecture des aspects fondamentaux de la démarche méthodologique employée, les éléments relatifs aux données utilisées, au modèle de culture et à la technique d'analyse multicritère retenus ont été abordés séparément.

#### **4.1 Approche méthodologique d'évaluation de vulnérabilité pour la période de référence**

Le choix de la période de référence est guidé principalement par deux critères : (1) la disponibilité d'une série satisfaisante de données sur les rendements agricoles et (2) un horizon temporel au cours duquel les agriculteurs étaient susceptibles de se rappeler de certaines conditions socio-économiques de productions pertinentes à l'étude de la vulnérabilité de référence des fermes productrices de maïs-grain aux changements climatiques dans un contexte de sources multiples de pression. Sur la base de ces deux critères, une période de référence comprise entre 1985 et 2005 a été choisie. Toutefois, pour les simulations agronomiques devant servir à l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la culture du maïs-grain, une plus longue période de temps a été considérée, soit 1961-2005. L'approche méthodologique adoptée pour évaluer, au sein des deux régions agricoles retenues, le niveau de vulnérabilité pour les différentes municipalités productrices

du maïs-grain au cours de la période de référence est basée sur cinq principaux postulats synthétisés dans les points suivants :

- a) Le secteur des fermes productrices de maïs-grain pouvant être considéré comme un système relativement complexe où interviennent, à différentes échelles spatiales et temporelles, plusieurs acteurs et un ensemble d'éléments tant biophysiques que socio-économiques, il est pratiquement impossible de considérer tous ces éléments dans une perspective de caractérisation de l'état du système. Par conséquent, l'appréciation de son degré de vulnérabilité dans un contexte de changements climatiques peut être réalisée en considérant certains de ses éléments caractéristiques, révélateurs de l'état du secteur.
- b) Étant donné que le concept de vulnérabilité cherche essentiellement à fournir des informations sur les effets néfastes réels ou potentiels subis par un système à la suite de l'influence d'une ou de plusieurs sources de pression, l'évaluation de l'état ou du statut ex post de certaines variables clés peut être assimilée ou considérée comme des indicateurs de vulnérabilité passée ou de référence du système.
- c) L'envergure des risques, des menaces ou des facteurs de pression ainsi que la ou les réponses du système peuvent être appréciées à travers l'analyse de la variation de ses principaux éléments. Plus le degré de variation des éléments révélateurs du système est élevé, plus grande sera sa sensibilité.
- d) Le statut ou l'état des variables retenues comme indicateurs de vulnérabilité est non seulement le résultat de la nature, de l'ampleur et de la durée des différents facteurs de pression, mais également celui des réponses apportées par le système. En d'autres termes, l'état des variables contient implicitement

l’empreinte des adaptations ou actions menées pour faire face aux sources de pressions auxquelles était confronté le système.

- e) Le niveau de variabilité des superficies en maïs-grain pour les producteurs agricoles qui participent au programme d’assurances de la Financière agricole du Québec peut être extrapolé à l’ensemble des producteurs des deux régions à l’étude.

En se basant sur ces cinq principaux postulats, l’approche méthodologique retenue pour évaluer la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain dans les régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est est divisée en trois grands groupes d’activités (Figure 8) :

- a) Collecte des données : Cette étape consiste à rassembler les données sur les rendements et les superficies en maïs-grain pour la période de référence retenue (1985-2005). Des statistiques agricoles provenant essentiellement de La Financière agricole du Québec ont été consultées afin de collecter les données sur les variables mentionnées ci-dessus. À ce niveau, il est important de signaler que le choix de cette source d’information était principalement guidé par l’impossibilité d’avoir, sur une période de temps relativement acceptable, ces types de données à l’échelle des municipalités auprès de l’Institut de la Statistique du Québec (ISQ), du Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec (MAPAQ) et de Statistique Canada. Toutefois, ces données obtenues de la Financière agricole du Québec concernaient uniquement les producteurs faisant partie de ses programmes d’assurance.



- b) Évaluation de la sensibilité : Pour apprécier la sensibilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est aux changements climatiques et aux facteurs socio-économiques, un coefficient de variation (CV) a été calculé pour les données de rendements agricoles et de superficies occupées par le maïs-grain obtenues pour les différentes municipalités qui pratiquent cette culture dans les deux régions. Le rendement agricole, étant surtout lié aux conditions biophysiques, notamment les conditions climatiques et pédologiques, la valeur de son CV a pu renseigner particulièrement sur la vulnérabilité du secteur aux modifications climatiques. Par contre, la valeur du CV des superficies en maïs-grain a pu informer à la fois sur la vulnérabilité aux facteurs biophysiques et socio-économiques, notamment ceux relatifs aux marchés, aux politiques agricoles et environnementales à différentes échelles, à la concurrence provenant d'autres secteurs économiques et aux facteurs d'ordre technologique. Les valeurs de CV pour les deux variables retenues ont servi d'indicateurs et ont constitué les profils de vulnérabilité des différentes municipalités aux variations climatiques et aux conditions socio-économiques. En fonction des valeurs obtenues, une classification des niveaux de vulnérabilité a été effectuée. Cette classification a permis de réaliser une typologie du degré de vulnérabilité des différentes municipalités aux conditions climatiques et socio-économiques.
- c) Les deux profils ont été ensuite combinés afin d'identifier les municipalités qui possèdent une vulnérabilité multiple (c'est-à-dire,

celles qui sont à la fois vulnérables aux conditions climatiques et aux sources de pression socio-économiques).

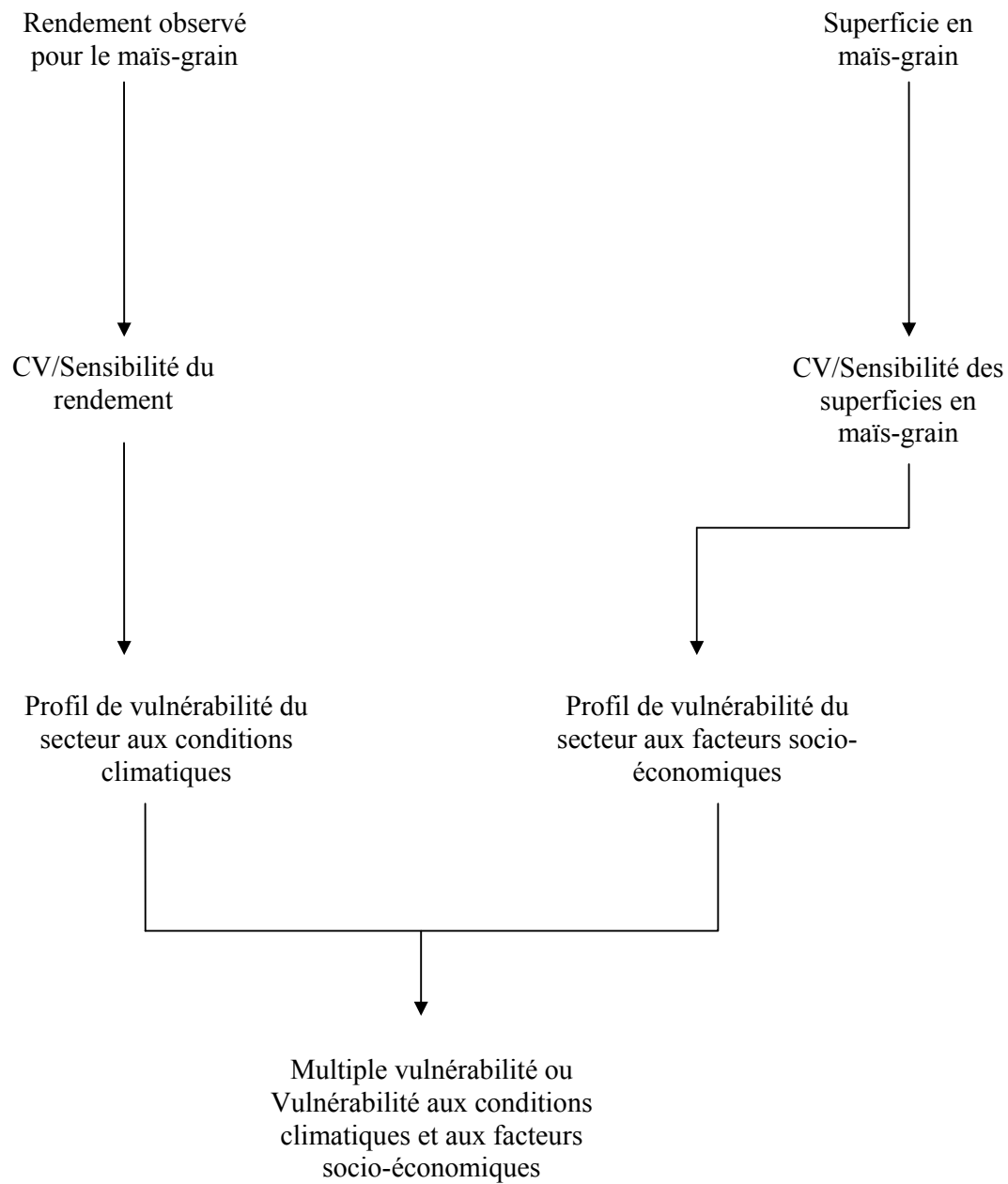


Figure 8. Approche utilisée dans l'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est pour la période de référence (1985-2005)

## 4.2 Évaluation de la capacité adaptative de référence des fermes

Comme indiqué précédemment, le niveau de variabilité obtenu pour les différents paramètres retenus (rendements et superficies en maïs-grain) est à la fois la résultante de l'influence des sources de pression biophysiques et socio-économiques et également des adaptations effectuées largement déterminées par une certaine capacité adaptative. Dans le but d'apporter des éléments d'explication aux variabilités des rendements et des superficies en maïs-grain et surtout afin d'avoir une ligne de base pour la comparaison et l'élaboration de scénarios de capacité adaptative du secteur pour la période future 2010-2039, un portrait de la capacité de réponse du secteur a été dressé pour la période de référence (1985-2005) et pour trois municipalités réparties dans les deux régions agricoles retenues (Burton et al., 2002 ; Smit et al., 2000). Ces trois municipalités sont représentées par Sainte-Martine et Saint-Sébastien pour la Montérégie-Ouest et Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour la MRC du Lac-St-Jean-Est.

Le choix de ces trois municipalités était essentiellement guidé par la disponibilité de séries de données climatiques indispensables à l'évaluation spatio-temporelle de la vulnérabilité du secteur des fermes productrices de maïs-grain aux variabilités et changements climatiques. En effet, des séries de données climatiques assez longues étaient disponibles pour les municipalités de Sainte-Martine et de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et pour une station climatique (Phillipsburg) relativement proche de la municipalité de Saint-Sébastien. Ce portrait de la capacité adaptative de référence du secteur, dont les principales étapes de son développement sont présentées à la figure 9, a été essentiellement élaboré à partir de techniques ethnographiques (groupes de discussion et enquêtes) combinées à une technique d'analyse multicritère (le Processus d'analyse hiérarchique (PAH)) et d'élaboration d'indicateurs de capacité adaptative.

Les points suivants fournissent les éléments essentiels contenus dans la figure 9 :

- Au cours de deux rencontres<sup>16</sup> (1 par région agricole) réalisées avec certains acteurs du secteur, notamment les producteurs et les professionnels agricoles, une présentation de la variabilité des rendements et des superficies du maïs-grain pour les municipalités retenues a été effectuée. Afin d'éviter ou de diminuer les risques de biais dans le processus, les séries temporelles des deux paramètres retenus ainsi que l'identification des mauvaises années ont été graphiquement présentées avec un minimum de facteurs explicatifs, notamment l'évolution des UTM.

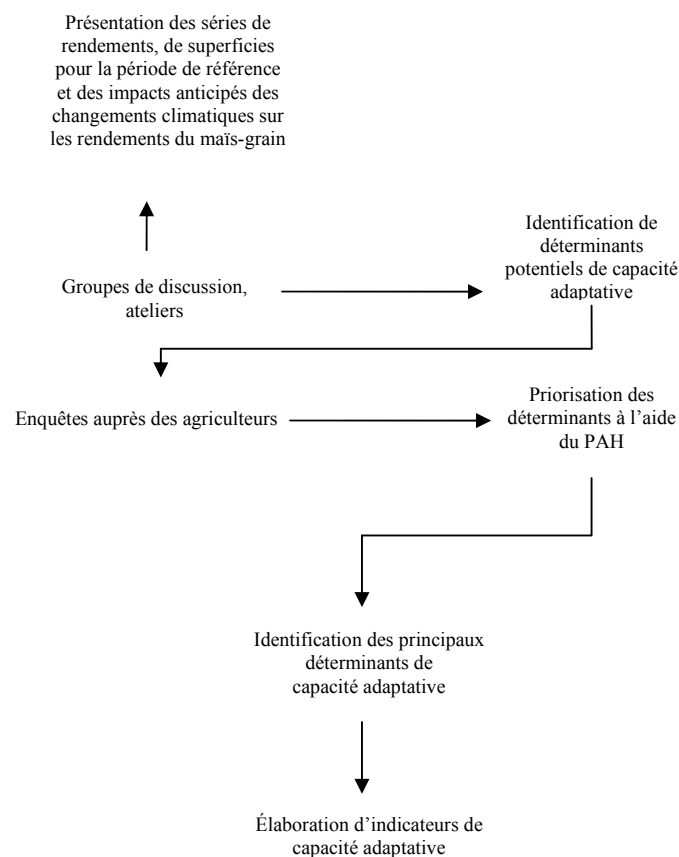


Figure 9. Principales composantes du processus d'évaluation de la capacité adaptative pour la période de référence (1985-2005)

<sup>16</sup> Ces rencontres ont été organisées le 26 novembre 2008 et 3 décembre 2008 dans les municipalités de Saint-Jean-sur-Richelieu et d'Alma respectivement.

- À la suite de la présentation des séries temporelles de rendements agricoles, de superficies en maïs-grain, de l'évolution des UTM et des impacts anticipés des changements climatiques sur les rendements de cette culture, des ateliers de travail en petits groupes d'acteurs ont été effectués. Ces ateliers ont porté essentiellement sur les facteurs ayant causé l'occurrence des mauvaises années, l'identification des mesures prises en vue de réduire la sensibilité ou la vulnérabilité du secteur aux différents stimuli identifiés et également sur les facteurs ayant favorisé ou entravé l'application de ces mesures. Les facteurs ayant soit favorisé ou entravé l'implantation des mesures envisagées ont servi de point de départ au processus d'identification des déterminants de capacité adaptative pour la période de référence. En d'autres termes, ces facteurs ont été considérés comme étant les déterminants potentiels de la capacité adaptative des producteurs des deux régions agricoles aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pressions

- Enquêtes<sup>17</sup> formelles auprès des producteurs agricoles et quelques professionnels choisis selon la technique de « boule neige ». Au nombre de 45 dont 15 dans chacune des trois municipalités, ces enquêtes formelles auprès des producteurs agricoles ont porté essentiellement sur l'identification des principaux déterminants de capacité adaptative aux conditions climatiques et socio-économiques au cours de la période de référence, 1985-2005 (fiche d'enquête en Annexe). Cette identification a été réalisée à l'aide de la technique du PAH. Choisi pour sa simplicité, son niveau de transparence, la vérification d'incohérence et ses potentialités dans les analyses de sensibilité, ce processus, considéré comme une technique qualitative, se base sur le jugement, la connaissance et l'expérience des acteurs concernés en vue de prioriser des éléments

---

<sup>17</sup> Ces enquêtes ont été effectuées entre le 4 et le 8 février 2008 pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et entre le 9 février et le 25 mars 2008 pour les municipalités de Sainte-Martine et Saint-Sébastien.

d'information utiles à plusieurs fins, notamment à une meilleure prise de décisions (Schomarker et Waid, 1982 ; Abildtrup et al., 2006; Saaty, 1986; Saaty, 1976). L'analyse hiérarchique était composée de deux niveaux : le premier niveau correspondait à l'objectif de l'analyse (dans le cadre de cette thèse, il s'agissait d'identifier les principaux déterminants de capacité adaptative du secteur des fermes productrices de maïs-grain), tandis que le second était constitué de critères (déterminants potentiels, plus précisément les facteurs identifiés par les producteurs lors des ateliers de travail). Le résultat de ce processus d'analyse multicritère a été l'établissement d'un ordre de priorité (ordre d'importance) sur la base d'allocation de poids aux différents déterminants. Les principales étapes et les axiomes considérés dans le PAH sont décrits au chapitre 6. Entre autres éléments de ces enquêtes auprès des producteurs et professionnels agricoles, il importe de souligner la partie touchant les facteurs couramment considérés dans le processus de prises de décisions en matière d'allocation des cultures sur les fermes. Cette partie a permis d'inventorier et de catégoriser ces principaux facteurs utilisés dans l'étape d'élaboration des scénarios de l'évolution future des CV des superficies en maïs-grain.

- L'élaboration des indicateurs de capacité adaptative pour la période de référence a été effectuée selon les étapes suivantes :

- a) Pour les deux régions agricoles, les cinq premiers déterminants ont été retenus comme les principaux déterminants de capacité adaptative des producteurs agricoles,
- b) À l'échelle de chaque région et ensuite pour chacune des trois municipalités, la somme des valeurs accordées, selon le PAH, à chacun des critères a été calculée,

- c) À l'intérieur de chaque région et ensuite pour chacune des trois municipalités, une moyenne pondérée par déterminant principal a été réalisée. Pour la pondération de la moyenne, une échelle constituée des valeurs suivantes, soit 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, et 5, a été considérée. Les valeurs inférieures à 1 étaient accordées au déterminant principal quand sa situation présente ou passée était jugée critique (dans l'atteinte de l'objectif de la hiérarchie) par les producteurs. Par exemple, une valeur de pondération de 1/5 (la plus faible valeur de l'échelle) correspondait à un déterminant principal dont la situation était critique (c'est-à-dire qui constituait un obstacle majeur à l'atteinte de l'objectif) et une valeur de 1 était considérée lorsque la situation du déterminant était jugée acceptable par les producteurs. Les valeurs de l'échelle supérieures à 1 (favorables à l'atteinte de l'objectif) étaient le contraire de celles retrouvées à gauche. La considération de valeurs inférieures ou supérieures à 1 permettait d'influencer le poids du déterminant dans le calcul de l'indicateur de capacité adaptative,
- d) À l'échelle de chaque région et ensuite pour chacune des trois municipalités, un indicateur de capacité adaptative de référence ( $ICA_{réf}$ ) a été obtenu à l'aide la formule suivante :

$$ICA_{réf} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1)$$

$X_i$  : moyenne pondérée pour chacun des cinq déterminants principaux (sans dimension),

$n$  : nombre de déterminants principaux

### **4.3 Scénarios de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain pour la période future**

De même que les conditions biophysiques de production, particulièrement les conditions climatiques, les contextes socio-économiques des fermes productrices de maïs-grain de la Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est sont susceptibles de subir des modifications dans le futur. Par conséquent, il serait incorrect d'évaluer la vulnérabilité future du secteur en considérant constants ou inchangés les facteurs socio-économiques identifiés comme déterminants de sa capacité adaptative de référence (Malone et Rovere, 2004). En d'autres termes, une telle approche servirait uniquement à évaluer la vulnérabilité actuelle aux conditions climatiques futures. Dans cet ordre d'idées, une représentation plausible des capacités adaptatives du secteur a été réalisée pour la période future. Une approche essentiellement basée sur la considération de scénarios socio-économiques, suivie d'élaboration de scénarios d'indicateurs de capacité adaptative pour la période future à l'échelle régionale pour 2010-2039 (centrée sur 2020), a été adoptée. L'adoption d'une telle approche peut être justifiée par la grande incertitude inhérente à l'évolution des déterminants de la capacité adaptative du secteur (Metzger, 2005).

Le processus suivi pour l'élaboration des scénarios d'indicateurs de capacité adaptative pour la période future est présenté à la figure 10. Il démarre avec un rappel des déterminants et des indicateurs de capacité adaptative de référence ou de base. En vue de s'assurer d'une certaine consistance au niveau des scénarios, cette étape est suivie de la considération et de la description sommaire des lignes directrices pour les deux scénarios d'émission de GES utilisés dans l'élaboration des scénarios climatiques, soit A2 et A1B (Nakicenovic et al., 2000). Ces lignes directrices, renseignant sur les grandes orientations économiques, démographiques et technologiques, sont ensuite utilisées dans le processus d'identification des scénarios d'indicateurs de capacité adaptative pour les agriculteurs des deux régions agricoles. À ce niveau, il importe de mentionner le caractère global des scénarios socio-



économiques qui pourraient être différents à une échelle spatiale plus petite comme celle des municipalités considérées (Abildtrup et al., 2006). La considération des scénarios socio-économiques à l'échelle globale est basée sur le postulat qu'ils seraient également valides à des échelles spatiales plus petites.

Deux scénarios d'indicateurs de capacité adaptative ont été élaborés pour chacune des deux régions agricoles. Pour élaborer ces scénarios de capacité adaptative, les étapes suivantes ont été effectuées :

- Identification des déterminants principaux de référence susceptibles d'être influencés par les vecteurs de changement au cours de la période future 2010-2039
- Tout en considérant le même ordre de priorité des déterminants principaux retenus, de nouvelles valeurs de pondération ont été considérées pour chacun des déterminants. Les nouvelles valeurs de pondération ont été définies sur la base de l'éventuelle influence des vecteurs de changement sur les déterminants principaux retenus.
- Calcul des scénarios d'indicateurs avec les déterminants principaux retenus à l'aide de la même formule utilisée dans le calcul des indicateurs de capacité adaptative pour la période de référence.

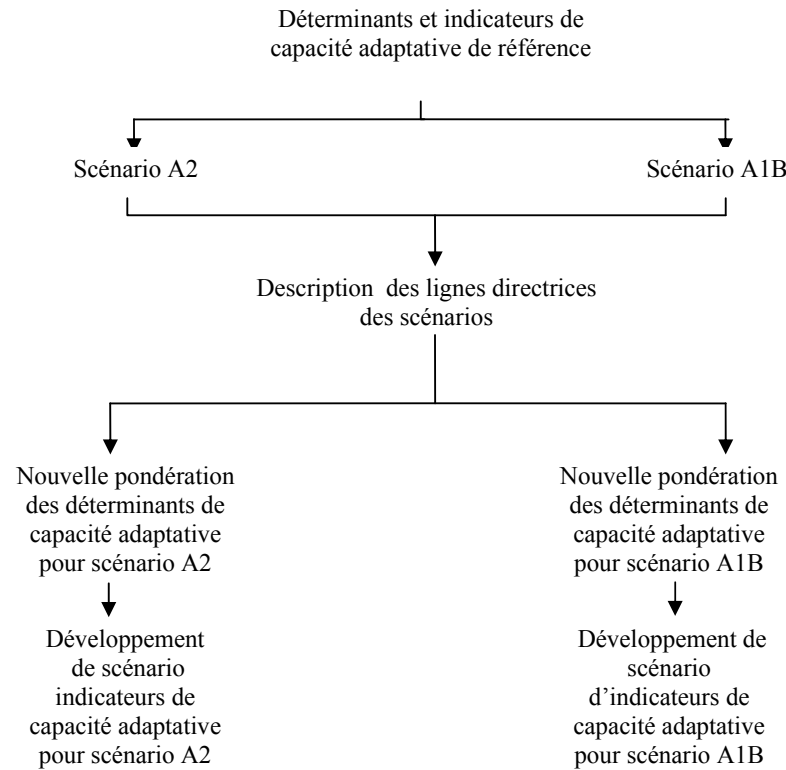


Figure 10. Processus de construction des scénarios de capacité adaptative pour la période future (2010-2039)

#### 4.4 Approche méthodologique d'évaluation de la vulnérabilité pour la période future

L'évaluation de la vulnérabilité future des fermes productrices de maïs-grain au sein des deux municipalités de la Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques est essentiellement basée sur une application simplifiée du cadre conceptuel de l'IPCC (2001b) dans lequel *la vulnérabilité est une fonction de l'exposition, de la sensibilité et de la capacité adaptative du système ou du secteur à l'étude*. Afin d'apprécier la vulnérabilité aux deux principales sources de pression pour la période future, ce cadre conceptuel a été synthétisé par la formule suivante :

$$V_{st} = CV_{pt} / ICA_{st}, \quad (2)$$

où :

$V_{st}$  (sans dimension): est la vulnérabilité du système ou du secteur  $s$  aux changements climatiques ou aux conditions socio-économiques pour le temps  $t$ ,

$CV_{pt}$  (sans dimension): est le coefficient de variabilité au temps  $t$  des rendements ou des superficies en maïs-grain

$ICA_{st}$  (sans dimension): est l'indicateur de capacité adaptative du système ou du secteur  $s$  au temps  $t$

Pour arriver à évaluer, selon la formule présentée ci-dessus, la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest (Sainte-Martine et Saint-Sébastien) et du Lac-St-Jean-Est (Lac-à-la-Croix/Métabetchouan) aux changements climatiques, dans un contexte d'expositions multiples, les étapes résumées dans la figure 11 ont été suivies. Celles-ci ont été constituées de :

- i. Collecte des données climatiques et pédologiques : Les paramètres climatiques observés indispensables au fonctionnement du modèle CERES-Maize de DSSAT provenaient du Service météorologique d'Environnement Canada. Ces paramètres collectés sous une base journalière correspondaient aux températures minimale et maximale et aux précipitations sous forme de pluie. Devant l'inexistence de données observées de rayonnement solaire pour les stations situées à l'intérieur ou à proximité des municipalités retenues, ce paramètre a été estimé selon l'équation développée par Villa (1993) et adaptée pour les conditions du Québec par Savoie (2006). Essentiellement, cette équation permettait d'estimer le rayonnement solaire en fonction des températures maximale et minimale journalières et du rayonnement extraterrestre reçu; ce dernier étant principalement fonction de la latitude de la station climatique. Pour les données relatives aux caractéristiques des sols,

elles ont été tirées de la base de données pédologiques en format numérique de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA, 2007).

- ii. Élaboration de scénarios climatiques : En vue de prendre en compte les différentes incertitudes dans le processus de modélisation du climat futur, il est généralement recommandé de considérer plusieurs scénarios climatiques (IPCC, 2001a ; IPCC 2007). Comme indiqué au tableau suivant, plusieurs scénarios climatiques ont été utilisés pour la période future. Ces scénarios climatiques ont été élaborés à partir des scénarios d'émission de GES A2 et A1B développés par Nakicenovic et al. (2000). Le scénario A2 correspond à une situation mondiale orientée vers la prédominance d'activités économiques à l'échelle régionale, tandis que le scénario A1B consiste en une situation mondiale dominée par des activités économiques à l'échelle globale avec un certain contrôle dans l'utilisation des combustibles fossiles. Les scénarios climatiques (pour les températures et les précipitations) élaborés à partir de données fournies par le Consortium Ouranos pour les municipalités retenues sont issus de deux types modèles :

- a) le Modèle régional climatique Canadien (MRCC 4.1.1 acu) : couvrant un domaine centré sur le Québec (122x88 points de grille) avec une maille horizontale de 45 km (Music et Caya, 2007), ce modèle régional a permis l'élaboration de deux scénarios climatiques, il s'agit d'une part des sorties directes du modèle et d'autre part d'un scénario construit à partir de la méthode de perturbation du climat, dite « méthode des deltas » (Rosenzweig et Parry, 1994). Ce MRCC a été piloté par le Modèle couplé climatique global (MCCG3, 4e

membre). Le scénario d'émission de GES A2 (Nakicenovic et al., 2000) a été utilisé pour ce modèle régional.

- b) Les MCG : à la suite d'un ensemble de 88 simulations pour les deux régions agricoles, trois scénarios issus de la méthode de perturbation du climat représentant des conditions médianes et extrêmes (chaud-sec et frais-humide) ont été choisis parmi les MCG dont les valeurs de changement de température et de précipitation étaient situées à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95 % (voir les cercles dans les diagrammes de dispersion aux figures 12 et 13). Dans ces figures, pour chacune des deux régions, l'axe des abscisses correspond au changement de température moyenne (en degré Celsius) prévue pour la période 2010-2039, tandis que l'axe des ordonnées représente le changement de précipitation (en ratio) sur la même période de temps. Ces MCG ont été forcés par le scénario A1B d'émission de GES (Nakicenovic et al., 2000). Comme indiqué au tableau 14, ces scénarios ont permis de couvrir une bonne gamme de conditions climatiques possibles, soit des conditions chaudes et sèches, fraîches et humides ou des conditions médianes, intermédiaires entre les deux conditions climatiques pouvant être qualifiées d'extrêmes. Les données de rayonnement solaire pour la période future ont été estimées à l'aide de l'équation basée sur les températures journalières (minimale et maximale) et le rayonnement extraterrestre dérivé à partir de la latitude des stations climatiques et de la déclinaison du soleil (Villa 1993).

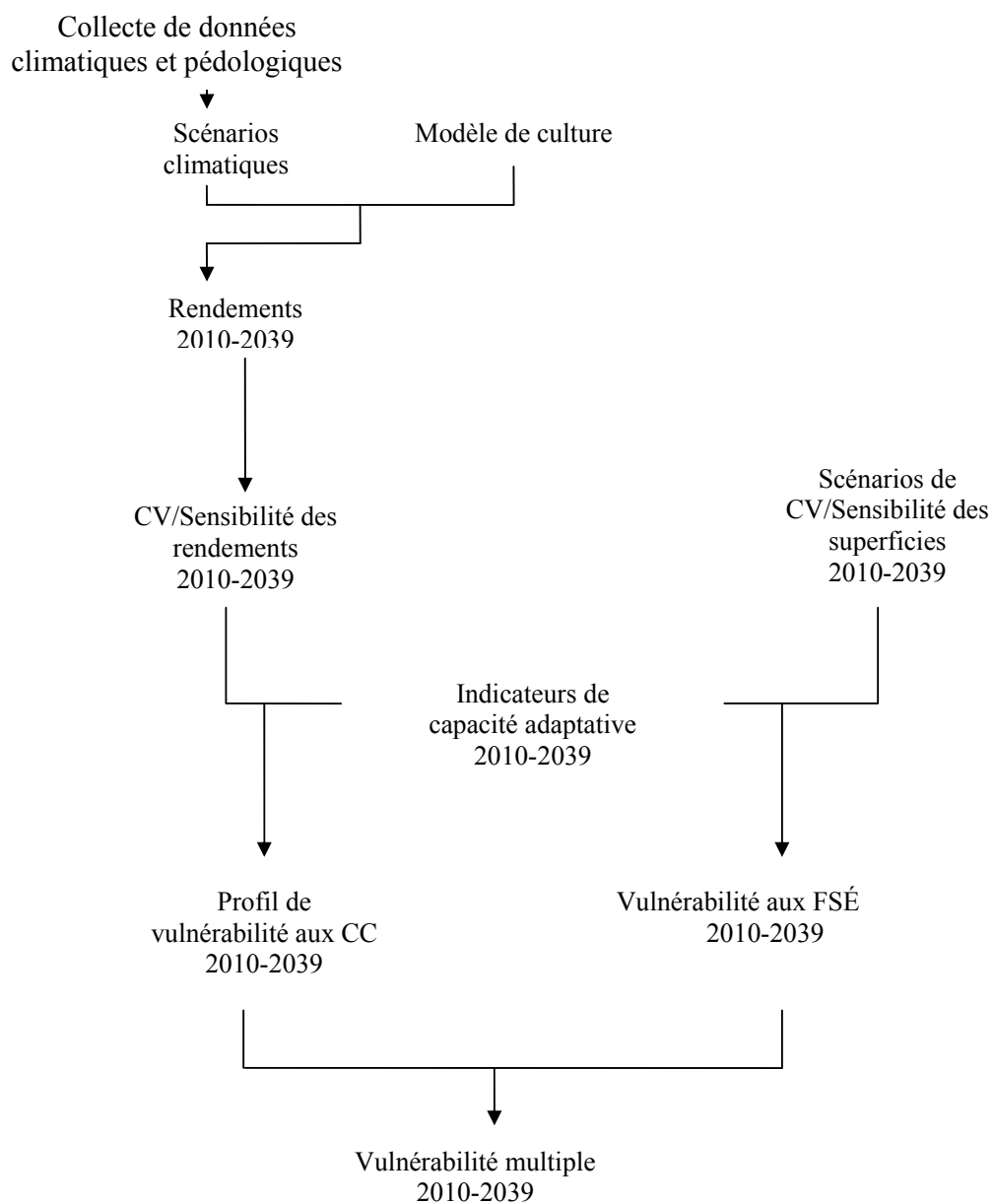


Figure 11. Approche utilisée dans l'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain pour la période future 2010-2039

Tableau 14. Caractéristiques des scénarios climatiques utilisés lors des simulations des rendements du maïs-grain

| Modèle/Méthode     | Scénario d'émission de GES | Caractéristiques |
|--------------------|----------------------------|------------------|
| MRCC               | A2                         | -                |
| Delta MRCC         | A2                         | -                |
| ECHAM5             | A1B                        | Frais et humide  |
| MIUB-ECHO-G-ECHO-G | A1B                        | Médian           |
| MIROC3.2 (medres)  | A1B                        | Chaud et sec     |

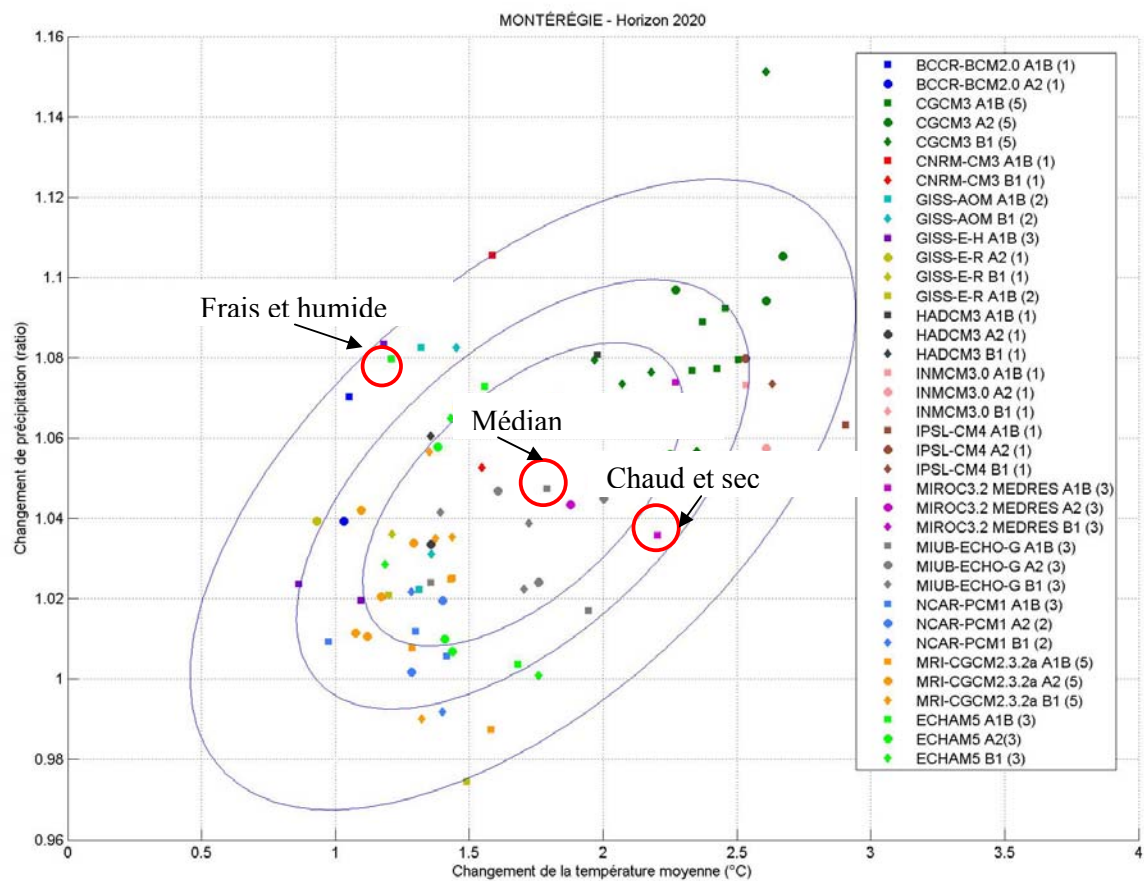


Figure 12. Diagramme de dispersion pour les différents modèles climatiques dans la région de Montérégie-Ouest

Source : Ouranos

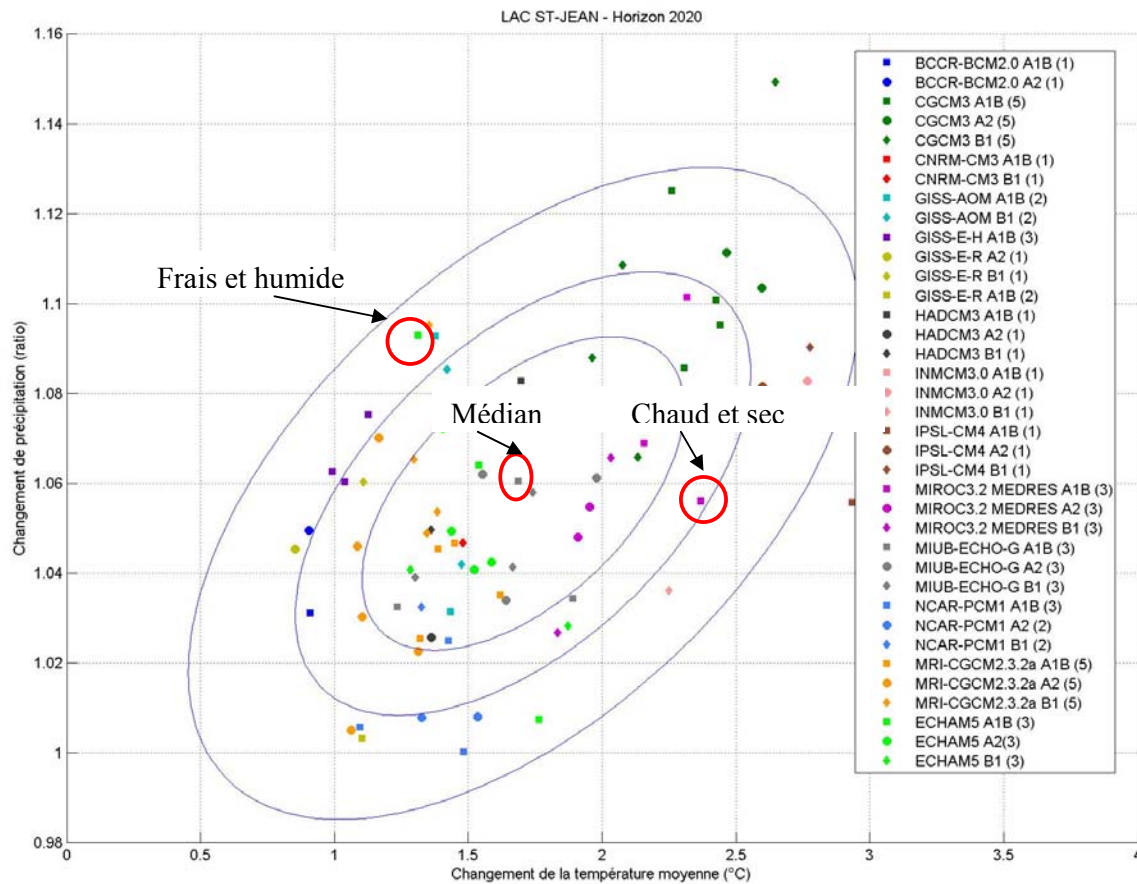


Figure 13. Diagramme de dispersion pour les différents modèles climatiques dans la région du Lac-St-Jean  
Source : Ouranos

iii. Simulation de rendements pour la période future 2010-2039 : Le modèle de culture CERES-Maize intégré dans DSSAT version 4.0.2.0 (Jones et al., 2003; Jones et Kiniry, 1986) a été utilisé afin de simuler les rendements du maïs-grain pour la période future en considérant les différents scénarios climatiques indiqués au tableau 14. Plusieurs facteurs ont guidé dans le choix de DSSAT. Parmi ceux-ci, on peut citer les suivants : a) il est très utilisé en Amérique du Nord, b) sa mise à jour est réalisée de façon régulière, c) le support technique est assuré par les



principaux développeurs, d) la communauté d'utilisateurs dispose d'un espace pour faciliter les échanges sur différents aspects du système, e) il offre la possibilité de modifier plusieurs paramètres environnementaux, notamment la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, ce qui n'est pas possible dans d'autres modèles de culture disponibles actuellement sur le marché (par exemple, le modèle de culture Hybrid-Maize) et f) il fournit un nombre relativement élevé de données de sorties par stades phénologiques facilitant un ensemble d'analyses agroclimatologiques. Deux types de simulations ont été réalisés à l'aide de ce modèle de culture : *le potentiel de rendement et le rendement limité par l'eau*. Comme indiqué à la figure 14<sup>18</sup> et d'après de Wit et de Vries (1982), le potentiel de rendement correspond à des conditions de production où le rendement est uniquement limité par la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, le rayonnement solaire, la température et les caractéristiques de la culture. Quant au rendement limité par l'eau, comme son nom l'indique, il fait référence à des conditions de production où le rendement est limité non seulement par les facteurs climatiques et les caractéristiques de la culture, mais également par l'eau. Pour les besoins d'évaluation de la vulnérabilité future, seuls les rendements limités par l'eau ont été considérés. Le choix de ce type de rendement était essentiellement basé sur l'hypothèse que les producteurs agricoles des municipalités retenues contrôlaient assez bien les maladies, les insectes ravageurs, les mauvaises herbes et que les éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore ne constituaient pas de facteurs limitants. Avant de réaliser les simulations proprement dites de rendements du maïs-grain pour la période future, des processus de calibration et de validation du modèle de culture ont été effectués pour les conditions spécifiques

---

<sup>18</sup> Les parties encadrées dans la figure réfèrent aux niveaux de rendements simulés dans le cadre de cette thèse.

aux municipalités considérées. Ces étapes sont fondamentales pour la crédibilité des résultats des rendements appréhendés (Timsina et Humphreys, 2006).

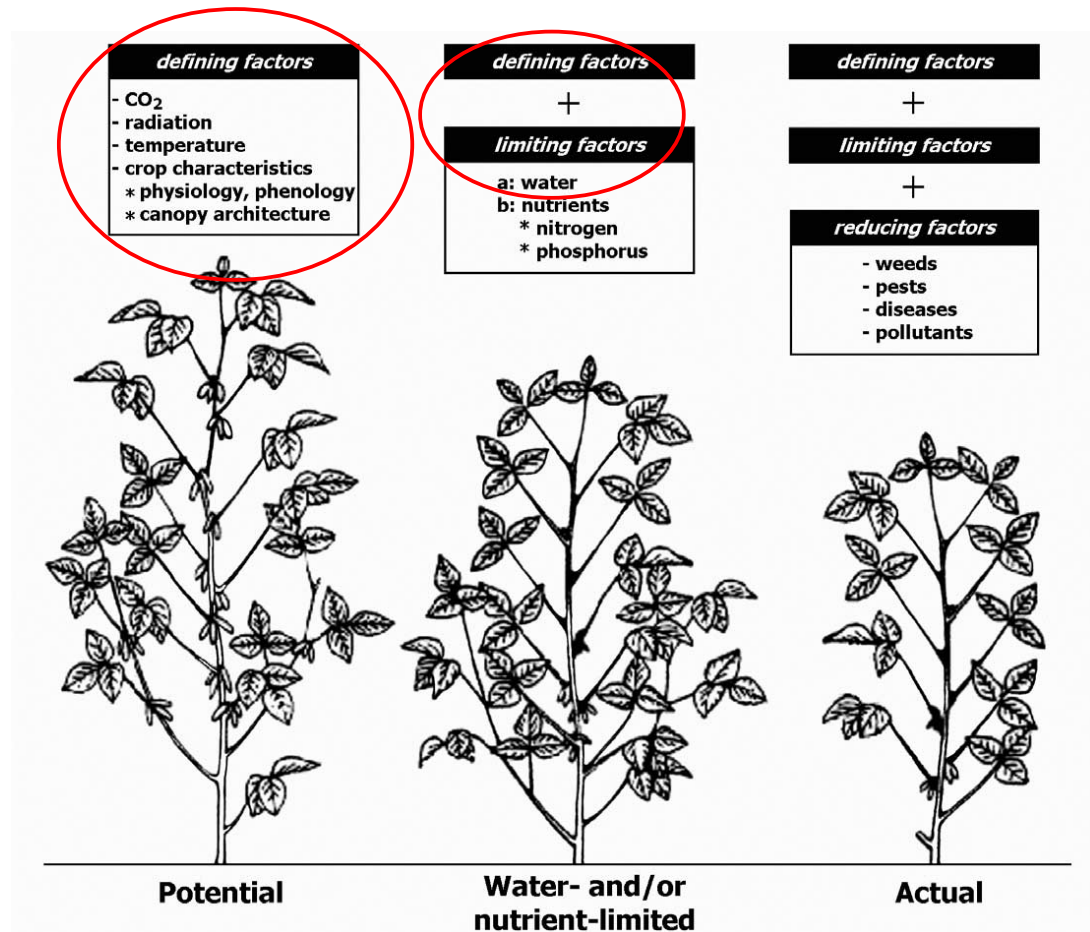


Figure 14. Hiérarchie de facteurs de croissance et de niveaux de rendements simulés par les modèles de culture  
Source : Van Ittersum et al., 2003

a) Calibration du modèle : Dans les modèles CERES, les caractéristiques génétiques des cultures, notamment celles du maïs-grain sont définies à l'aide de valeurs de coefficients génétiques. Ces coefficients déterminent les réponses d'un cultivar aux facteurs environnementaux et conditionnent également leur niveau de rendement (Hunt et al., 1993). Conventionnellement, ces coefficients génétiques sont obtenus à l'aide

d'établissements et de suivi de parcelles expérimentales ou d'expériences en cabinets de croissance. Ainsi sont rendus disponibles dans DSSAT les coefficients génétiques pour les cultivars de maïs-grain calibrés dans des conditions environnementales spécifiques. Toutefois, ceux-ci sont très rares et voire inexistants pour les conditions de production au Québec et plus particulièrement pour les municipalités considérées. À des fins d'évaluation des impacts des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain, toute tentative d'utiliser ces cultivars non calibrés pour les municipalités à l'étude est incorrecte, à moins qu'on s'intéresse à une étude de sensibilité des rendements du maïs-grain à ces cultivars ou hybrides disponibles dans DSSAT. De ce fait, un processus de calibration du modèle CERES-Maize dont les principales étapes ont été synthétisées dans la figure 15 a été effectué. Ce processus itératif, basé sur les principes du logiciel de calcul de coefficient génétique GENCALC de Hunt et al. (1993) débute avec le choix des cultivars disponibles dans DSSAT pour le modèle CERES-Maize. Ce choix de cultivar peut être facilité par les connaissances théoriques ou expérimentales de l'utilisateur sur les relations entre les conditions climatiques et certains stades phénologiques de la culture du maïs-grain. Des simulations sont ensuite réalisées pour les cultivars choisis. Les rendements simulés pour les différents cultivars sont comparés à la série des rendements observés dans les municipalités retenues. L'objectif de cette comparaison était d'arriver à une combinaison optimale de coefficients génétiques susceptibles de réduire le plus que possible les écarts entre les deux séries de rendements, en l'occurrence les séries

observées et simulées (en supposant que les autres paramètres relatifs aux pratiques culturales sont conformes à ce qui se fait dans les municipalités étudiées). Pour apprécier ces écarts, l'Erreur quadratique moyenne (RMSE) largement utilisée dans la calibration et la validation de différents modèles, a été considérée (Xiong et al., 2008; Kobayashi et Salam, 2000 ; Timsina et Humphreys, 2006 ; Willmott, 1982).

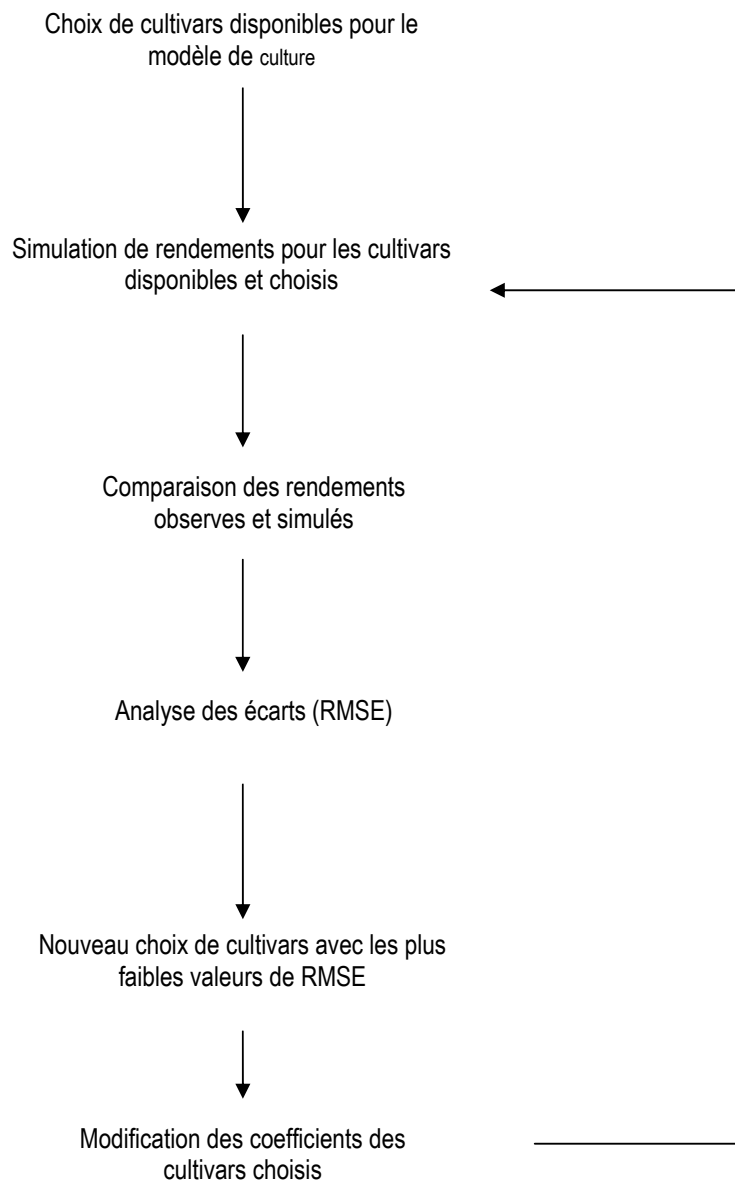


Figure 15. Étapes suivies pour la calibration du modèle CERES-Maize

Le RMSE a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$P_i$  : rendements simulés ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

$O_i$  : rendements observés ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), et

$n$  : le nombre de paires

Les cultivars avec les plus faibles valeurs de RMSE sont retenus pour la suite du processus de calibration, car ils fournissaient des rendements dont les valeurs étaient les plus rapprochées de celles des rendements observés. À partir de ce stade, on a procédé à une modification des coefficients génétiques des cultivars retenus. Les coefficients touchant les aspects phénologiques du développement de la culture du maïs-grain ont été d'abord modifiés et ensuite ceux relatifs aux paramètres déterminant le rendement. Chaque série de modifications apportées aux coefficients génétiques a été suivie d'étapes de simulations sur une période correspondante à la moitié de la série des données observées et ensuite d'une comparaison des séries observées et simulées toujours à l'aide du RMSE. Le processus se poursuivait pour s'arrêter au moment où aucune combinaison n'arrivait à faire baisser la valeur du RMSE.

b) validation du modèle : L'une des étapes préalables à l'utilisation d'un modèle de culture dans l'évaluation des rendements appréhendés est l'appréciation de sa capacité à reproduire les rendements observés et ceci tant en termes de moyennes que de variabilités. Fort de ce principe, en utilisant une série de données indépendantes, en l'occurrence la

deuxième moitié des séries des données observées, un processus de validation du modèle CERES-Maize a été effectué pour les différentes municipalités retenues. Ce processus de validation consistait essentiellement en une comparaison des rendements observés avec ceux simulés en utilisant les données climatiques observées et en considérant l'eau comme le seul facteur limitant le rendement. La figure 16 décrit les principales étapes suivies lors de ce processus. Trois principaux paramètres ont été considérés afin de statuer sur le niveau de précision ou de fiabilité du modèle dans les conditions des municipalités retenues. Ces paramètres étaient l'efficacité du modèle (EF), l'indice d et le RD (Différence relative). Leur calcul a été effectué selon les formules suivantes :

$$EF = 1 - \sum (O_i - P_i)^2 / \sum (O_i - O_{im})^2 \quad (4)$$

EF : efficacité ou précision du modèle (sans dimension),

$P_i$  et  $O_i$  déjà définis, et

$O_{im}$  : moyenne des rendements simulés ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (5)$$

d : niveau de précision du modèle (sans dimension)

$$P'I = P_i - O_{im} \quad (6)$$

$O_{im}$  : déjà défini, et

$$O'i = O_i - O_{im} \quad (7)$$

$$RD = [\sum (O_i - P_i) / O_i] * 100 / n \quad (8)$$

RD : différence relative (%), et

$P_i$  et  $O_i$  et  $n$  déjà définis

Les paramètres EF et d, semblables au coefficient de détermination  $R^2$ , comparent directement les rendements simulés par le modèle à ceux observés. Une valeur de 0 pour ces deux paramètres (EF et d) signifie que le modèle n'est pas mieux qu'une simple moyenne, une valeur proche ou égale à 1 indique un bon modèle, tandis qu'une valeur négative (dans le cas d'EF) sous-entend un mauvais modèle (Vanclay et Skovsgaard, 1997; Mayer et Butler, 1993; Fay et al., 2006; Yang et al., 2000; Anothai et al., 2008). Le RD, exprimé en %, renseigne sur la différence entre la moyenne des valeurs de rendements observés et ceux simulés. Une valeur de RD de  $\pm 15\%$  est jugée acceptable par Ritchie et al. (1998).

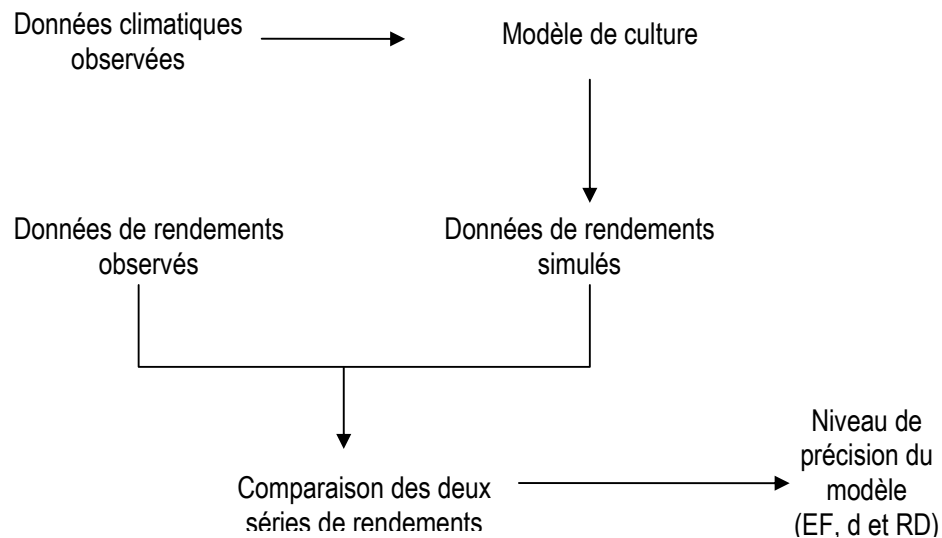


Figure 16. Étapes du processus de validation du modèle de culture

c) Simulation des rendements : Une fois le modèle CERES-Maize calibré et validé dans les conditions biophysiques des municipalités retenues, les rendements (potentiel et limité par l'eau) pour la période 2010-2039 ont été simulés. Ces simulations ont été effectuées pour les différents scénarios climatiques susmentionnés et en considérant deux grands groupes de cultivars et de concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub>. Pour les cultivars, deux types ont été considérés lors des simulations, l'un était représenté par un cultivar de référence et l'autre se référait à un cultivar plus performant, appelé cultivar futur. Dans le cadre de cette étude, le cultivar plus performant faisait référence à un cultivar qui permettait d'avoir un niveau de rendement supérieur au cultivar de référence, en l'occurrence le cultivar préalablement calibré et validé. Le choix de l'intégration d'un nouveau cultivar était principalement guidé par la réalité du terrain où les producteurs adoptent régulièrement de nouveaux hybrides mieux adaptés aux conditions climatiques. Cette façon d'opérer serait encore plus susceptible d'être la règle dans des conditions climatiques futures avec des températures plus chaudes. Pour apprécier l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sur les niveaux de rendements (Tsuji et al., 1998), plusieurs valeurs de concentration ont été considérées. Pour la concentration atmosphérique de référence en CO<sub>2</sub>, une valeur moyenne de 365 parties par million (ppm) a été considérée, tandis que celles pour les scénarios A2 et A1B au cours de la période 2010-2039 ont été estimées à 429 et 432 ppm, respectivement (Nakicenovic et al., 2000). Pour estimer les impacts des changements climatiques appréhendés sur



les rendements en considérant les deux types de cultivar, la formule suivante a été utilisée :

$$\text{changement moyen (\%)} = [(rm_2 - rm_1)/rm_1]/100 \quad (9)$$

$rm_1$  : rendement simulé pour 2010-2039 (kg ha<sup>-1</sup>)

$rm_2$  : rendement simulé pour 1961-2005 (kg ha<sup>-1</sup>)

iv. Évaluation de la sensibilité future des paramètres caractéristiques du secteur :

En considérant que les deux paramètres révélateurs de l'état du système au cours de la période de référence le seront également au cours de la période future, une estimation de leur niveau de sensibilité a été effectuée. Pour la variable « rendement agricole », l'estimation de sa sensibilité a été directement effectuée en calculant un CV pour chacune de séries de rendements obtenus selon les différents scénarios climatiques, les types de cultivar et les concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub>. Quant à l'appréciation de la sensibilité future de la variable « superficie en maïs-grain », compte tenu de la difficulté d'évaluer ses principaux déterminants socio-économiques et voulant éviter la prise en compte d'une vision unique, l'approche de scénarios a été envisagée (Ewert et al., 2005; Lambin et al., 2000; Abildtrup et al., 2006). Les étapes suivies pour construire ces scénarios d'évolution du CV des superficies pour les municipalités retenues sont présentées à la figure 17. Les moteurs de développement ou les vecteurs de changement à l'échelle globale pour les deux scénarios d'émission de GES préalablement mentionnés ont été considérés. Ensuite, une pondération des valeurs de CV des superficies en maïs-grain obtenues au cours de la période de référence a été effectuée. Cette pondération est basée sur une hypothèse générale relative à l'influence respective et appréhendée des deux familles de scénarios d'émission sur la

direction et l'ampleur des CV de superficies en maïs-grain au cours de la période future 2010-2039. Il a été considéré qu'une société orientée vers une globalisation de l'économie provoquerait une plus grande variabilité des superficies en maïs-grain comparée à une société avec une orientation économique régionale.

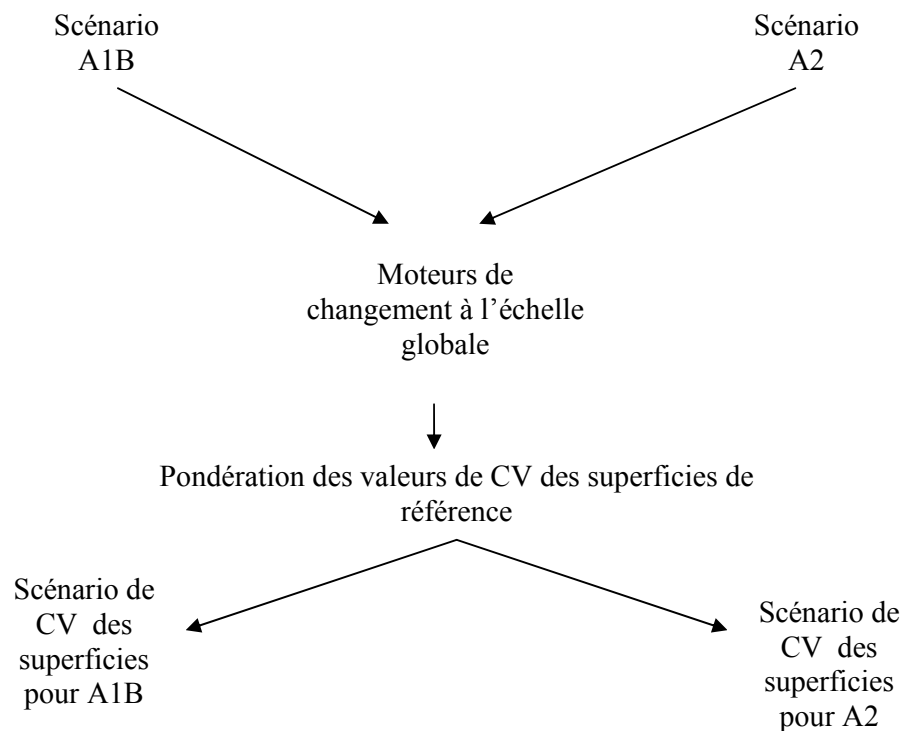


Figure 17. Étapes de construction des scénarios de CV futur pour les superficies en maïs-grain

## Chapitre 5. DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES

L'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est a requis un ensemble diversifié de données. Tel qu'indiqué à la figure 18, en se basant sur le critère « période couverte ou horizon temporel », ces données peuvent être divisées en deux principaux groupes dont l'un correspond aux données historiques couvrant la période de référence 1985-2005 (ou 1961-2005 pour les simulations des rendements agricoles) et l'autre constitué des données ou scénarios futurs couvrant la période 2010-2039. Pour chacun de ces sous-groupes de données, il est possible d'en effectuer une subdivision basée sur leur utilisation dans l'appréciation des composantes du concept de vulnérabilité. Ces subdivisions sont constituées d'une part d'éléments biophysiques et socio-économiques utilisés dans l'évaluation de la sensibilité du secteur étudié et d'autre part d'éléments strictement socio-économiques entrant dans l'appréciation du concept de capacité adaptative.

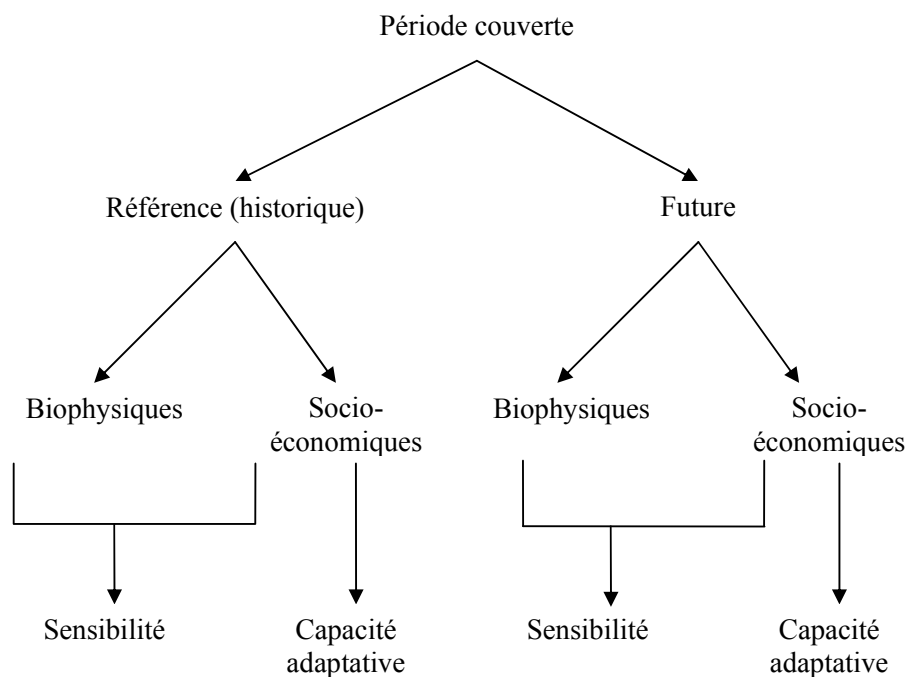


Figure 18. Types de données utilisées dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain de la Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est

## 5.1 Données pour la période de référence

Pour la période de référence, les aspects biophysiques considérés étaient constitués des données relatives aux variables climatiques (notamment, les températures minimales et maximales, les précipitations journalières et le rayonnement solaire estimé), à la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, aux rendements agricoles, aux conditions pédologiques, aux coefficients génétiques des cultivars pour le maïs-grain et aux pratiques culturales. Les données climatiques historiques étaient exclusivement utilisées lors des processus de calibration et de validation du modèle de culture. À l'exception de Sainte-Martine, les données climatiques historiques utilisées couvraient la période allant de 1961-2005 (Tableau 15). Pour la station de Sainte-Martine, la série des données climatiques couvrait la période allant de 1963-2005.

Pour la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, la période de référence a été divisée en deux : une première période allant de 1961 à 1990 et une seconde période couvrant la période 1991 à 2005. Pour la période 1961-1990 et pour les municipalités des deux régions agricoles, une valeur de 333 ppm a été retenue, tandis qu'une valeur de 365 ppm a été considérée pour la période 1991-2005. Ces valeurs de concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> n'étaient que des moyennes calculées au cours des deux périodes de temps, en l'occurrence 1961-1990 et 1991-2005.

Bien qu'elles soient de longueur variable, les séries de données sur les rendements du maïs-grain étaient généralement disponibles pour les différentes municipalités de la Montérégie-Ouest. Toutefois, ce n'était pas le cas pour les différentes municipalités du Lac-St-Jean-Est. La longueur des séries de données sur les rendements du maïs-grain disponibles pour les trois municipalités retenues à des fins de comparaison des niveaux de vulnérabilité est présentée au tableau 16.

Tableau 15. Séries de données climatiques historiques utilisées dans les processus de calibration et de validation du modèle de culture

| <b>Nom de la station<br/>climatique</b> | <b>Localisation<br/>(latitude, longitude,<br/>élévation (m))</b> | <b>Longueur des séries<br/>de données</b> | <b>Variables climatiques</b>                              |
|---|--|---|---|
| Sainte-Martine                          | 45,25 °, -73,80 °, 38  | 43 ans (1963-2005)                        | Températures<br>minimales, maximales<br>et précipitations |
| Phillipsburg pour<br>Saint-Sébastien    | 45,02 °, -73,07 °, 100   | 45 ans (1961-2005)                        | Températures<br>minimales, maximales<br>et précipitations |
| Lac-à-la-Croix                          | 48,42 °, -71,75 °, 137   | 45 ans (1961-2005)                        | Températures<br>minimales, maximales<br>et précipitations |

Source de données : Environnement Canada (2007)

En effet, si les séries de données de rendement sur le maïs-grain étaient assez longues pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest, 21 années et 23 années pour Sainte-Martine et Saint-Sébastien respectivement, celle de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour le Lac-St-Jean-Est était particulièrement courte, en effet moins de 10 années.

Tableau 16. Longueur des séries de données de rendements agricoles utilisées pour les trois municipalités retenues

| <b>Municipalités</b>         | <b>Nombre d'années de données de rendements</b> | <b>Années</b>              |
|------------------------------|---|----------------------------|
| Sainte-Martine               | 21  | 1985 à 2005                |
| Saint-Sébastien              | 23  | 1982 et 1983 ; 1985 à 2005 |
| Lac-à la-Croix/Métabetchouan | 6   | 2000 à 2005                |

Source de données : Financière agricole du Québec (2007)

Les informations pédologiques requises par le modèle de culture et utilisées dans le processus de modélisation du maïs-grain sont représentées par la texture, le pH, la teneur en carbone organique, la capacité d'échange cationique. Le tableau 17 indique les valeurs considérées pour la texture, le pH et la teneur en carbone organique. L'azote total par horizon a été estimé à l'aide d'un ratio C : N de 10 : 1 (Gijssman et al., 2002).

En ce qui concerne les coefficients génétiques considérés pour la période de référence, tel que mentionné au niveau de la méthodologie, ils sont issus du processus de calibration du modèle. N'étant pas des données secondaires, mais plutôt des données issues d'étapes méthodologiques de la thèse, les valeurs de ces coefficients génétiques sont présentées au niveau du chapitre sur les résultats.

Les données sur les pratiques culturales, utilisées également dans le processus de calibration et de validation du modèle, portaient sur la densité de semis, les espaces entre les

rangées, la profondeur de semis et la profondeur de labour. Ces données étaient constantes pour les trois municipalités. Par contre, afin de tenir compte des conditions climatiques variables d'une saison de production à l'autre, des dates de semis ont été estimées pour chacune des années. Selon le scénario climatique considéré, les périodes de semis variaient, en jours julien, entre 118 et 127 pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien et entre 132 et 147 pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan.

Tableau 17 . Paramètres pédologiques considérés dans les simulations des rendements du maïs-grain

| <b>Municipalités</b>         | <b>Texture dominante</b> | <b>pH</b> | <b>Carbone organique (%)</b> |
|------------------------------|--------------------------|-----------|------------------------------|
| Sainte-Martine               | Argile                   | 5,8       | 2,6                          |
| Saint-Sébastien              | Argile                   | 6,7       | 2,6                          |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | Limon                    | 5,9       | 2,8                          |

Ces estimations ont été effectuées à l'aide des critères de température et de précipitations définis dans Bootsma et al. (2004). Pour les paramètres invariables de pratiques culturales, les valeurs suivantes ont été utilisées (Financière agricole du Québec 2005 ; MAPAQ, 1998) :

- Densité de semis : 7 plants/m<sup>2</sup>
- Espace entre rangées : 60 cm
- Profondeur de semis : 3 cm
- Profondeur de labour : 20 cm

Outre les données sur les rendements agricoles, des données sur les superficies en maïs-grain ont été également considérées dans l'évaluation de la sensibilité du secteur aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression. Le nombre d'années de données sur les superficies en maïs-grain était équivalent à celui des rendements agricoles, autrement dit les données de superficies en maïs-grain existaient pour toutes les années dont les données de rendement étaient disponibles.

En ce qui a trait aux données socio-économiques utilisées pour évaluer la capacité adaptative du secteur, elles sont, à l'instar des données sur les coefficients génétiques, issues d'étapes méthodologiques de la thèse. Par conséquent, elles sont également présentées au niveau du chapitre sur les résultats.

## **5.2 Données pour la période future**

Les données climatiques utilisées pour la période future 2010-2039 provenaient des scénarios climatiques élaborés à partir des méthodes mentionnées au niveau de la méthodologie. Ces scénarios climatiques étaient représentés d'une part par les sorties directes du MRCC et d'autre part par les deltas issus du MRCC pour le scénario d'émissions de GES A2 et de ECHAM5, MIUB-ECHO-G-ECHO-G, MIROC3.2 (medres) pour le scénario d'émissions de GES A1B. Pour ces scénarios climatiques, les paramètres relatifs aux températures minimales, maximales et précipitations journalières ont été également considérés, tandis que ceux relatifs aux rayonnements solaires ont été une fois de plus estimés à partir de la méthode indiquée au niveau de la méthodologie. Comme souligné au niveau de la méthodologie, ces données climatiques ont été utilisées pour apprécier la sensibilité des rendements du maïs-grain aux variabilités et changements climatiques.

Pour les trois municipalités retenues, les concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> variaient selon le scénario d'émission de GES considéré. Pour le scénario A2, sa valeur était



estimée à 429 ppm, tandis qu'une valeur de 432 ppm a été considérée pour le scénario A1B. En effet, le scénario A2 est relativement plus conservateur en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> comparativement au scénario A1B (Nakicenovic et al., 2000).

Produits des étapes méthodologiques de la thèse, les rendements futurs sont présentés au niveau du chapitre sur les résultats. Ils portent généralement sur les rendements du maïs-grain anticipés sous différentes conditions biophysiques, notamment de nouveaux scénarios climatiques, de concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et également de l'adoption de nouveaux hybrides ou cultivars.

À l'exception des dates de semis qui variaient en fonction de nouvelles conditions de températures et de précipitations, les paramètres relatifs aux conditions pédologiques et aux pratiques culturales n'ont pas été modifiés. Pour le calcul de ces dates de semis, la même méthode employée pour la période de référence a été utilisée pour la période future.

En ce qui a trait aux hybrides ou cultivars de maïs-grain, les coefficients génétiques variaient selon le scénario considéré. Pour le scénario de l'« agriculteur réfractaire aux changements », les coefficients calibrés au cours de la période de référence ont été à nouveau retenus pour les simulations de rendements agricoles futurs. Par contre, pour le scénario où l'agriculteur adoptait un hybride plus performant, des coefficients génétiques différents ont été utilisés. Ces coefficients, déjà disponibles dans DSSAT, étaient différents d'une région à l'autre à cause des régimes de température spécifique à chacune des deux régions. Toutefois, ils ont été choisis en fonction de leurs valeurs de degrés-jours<sup>19</sup> (DJ) plus élevées que celles des cultivars de référence. Avec des valeurs de DJ plus élevées, les cultivars considérés pour la période future seraient plus adaptés aux conditions climatiques plus chaudes et aux saisons de croissance relativement plus longues. Le tableau 18 présente les valeurs des différents coefficients génétiques pour les deux nouveaux hybrides ou cultivars considérés.

---

<sup>19</sup> Différence entre la température moyenne d'un jour donné et une température de base. Il est exprimé en degré Celsius \* jours.

Tableau 18 . Valeurs des coefficients génétiques des cultivars plus performants

| Municipalités                | Noms cultivar dans DSSAT | Coefficients génétiques |                   |         |                   |            |           |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------------|------------|-----------|
|                              |                          | P1 (DJ)                 | P2 sans dimension | P5 (DJ) | G2 sans dimension | G3 mg/jour | PHINT(DJ) |
| Sainte-Martine               | WASH/GRAIN-1             | 185,00                  | 0,40              | 775,00  | 836,00            | 12,00      | 38,90     |
| Saint-Sébastien              | WASH/GRAIN-1             | 185,00                  | 0,40              | 775,00  | 836,00            | 12,00      | 38,90     |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | F16 X F19                | 165,00                  | 0.00              | 685,00  | 907,90            | 10,00      | 38,90     |

P1 : temps thermique de l'émergence à fin de la phase juvénile (DJ)

P2 : influence de la photopériode sur la plante et plus précisément sur l'induction florale (sans dimension)

P5 : temps thermique de l'apparition des soies à la maturité physiologique, correspondant à l'apparition du point noir (DJ)

G2 : nombre de grains par plante

G 3 : taux de remplissage des grains (mg/grain/jour)

PHINT : Phyllochron (temps thermique entre l'apparition de deux feuilles successives) (DJ).

Comme pour la période de référence, le paramètre « superficies en maïs-grain » et plus précisément son CV a été également considéré dans l'évaluation de la sensibilité du secteur aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression. Basées sur la construction de scénarios, les valeurs de CV pour les superficies en maïs-grain au cours de la période future sont présentées au niveau du chapitre sur les résultats.

De même que la capacité adaptative pour la période de référence, les indicateurs de capacité adaptative pour la période future dérivait d'étapes méthodologiques de la thèse. Ils sont, par conséquent, présentés également au niveau du chapitre sur les résultats.

## **Chapitre 6. DESCRIPTION DU MODÈLE CERES-MAIZE DE DSSAT ET DE LA TECHNIQUE DU PROCESSUS D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE**

Le modèle de culture et la technique du PAH sont au cœur de la méthodologie utilisée pour évaluer l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité du secteur aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression. Ces outils ont permis d'avoir dans un temps relativement court les données nécessaires à l'évaluation des différentes composantes du concept de vulnérabilité, notamment la sensibilité et la capacité adaptative. La description sommaire et ciblée de ces outils est présentée ci-dessous.

### **6.1 Description du modèle CERES-Maize de DSSAT**

Fruit des travaux d'un réseau de chercheurs internationaux réunis dans le cadre du projet de l'« International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer » (IBSNAT), le modèle DSSAT a été conçu vers les années 1988 en vue d'améliorer les processus de prises de décisions en agriculture (Jones et al., 2003). En tant que système, DSSAT est constitué d'un ensemble de programmes indépendants pouvant échanger des données entre eux au besoin. Comme indiqué à la figure 19, au centre de ces programmes se trouvent les différents modèles de simulation de cultures.

En termes de structure, DSSAT a grandement évolué. Voulant faciliter, entre autres, une collaboration plus efficace entre les groupes travaillant sur les différents modèles de culture, une approche modulaire a été adoptée dans les récentes versions de DSSAT, notamment DSSAT 4.0.2.0 (Jones et al., 2001). La figure 20 laisse voir les principaux modules retrouvés dans DSSAT version 4.0.2.0. On y trouve 5 principaux modules (climat, sol, plante, sol-plante-atmosphère et pratiques culturales) et plusieurs sous-modules interdépendants en termes d'échanges de données (Jones et al., 2003).

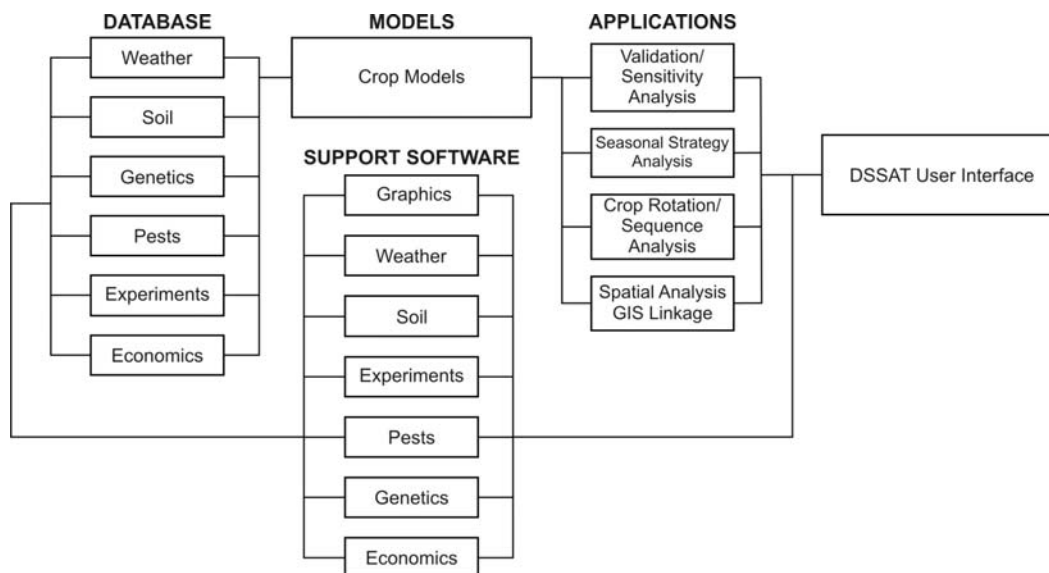


Figure 19. Diagramme des principales composantes de DSSAT  
Source : Jones et al., 2003.

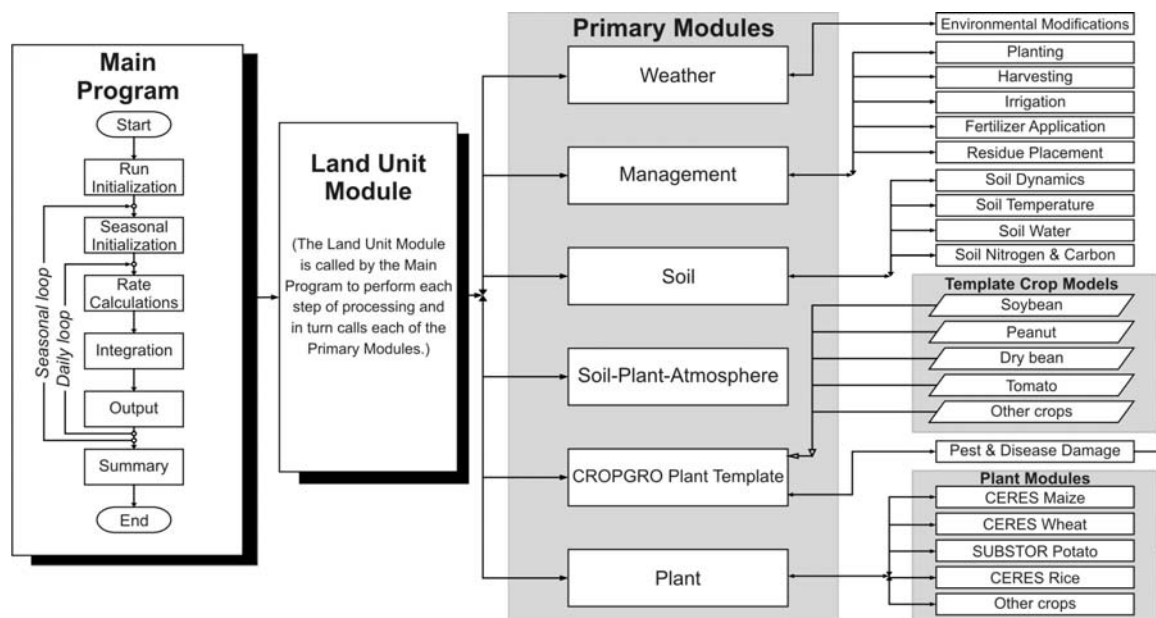


Figure 20. Diagramme des principaux modules de DSSAT  
Source : Jones et al., 2003

Pour fonctionner, DSSAT exige un nombre minimum de données relatives au site choisi, aux conditions climatiques journalières, aux sols, aux conditions initiales résultant de la saison de culture précédente, à un ensemble de coefficients génétiques caractérisant le cultivar étudié et aux pratiques culturales (Hunt et Boote, 1998). Afin d'évaluer ou de valider les résultats issus des simulations effectuées, DSSAT exige essentiellement des données sur les différents stades phénologiques, les variables de croissance et de rendements. Contrairement aux précédentes, les récentes versions de DSSAT, notamment la version 4.0.2.0 présente un nouveau modèle de système de culture, appelé « Cropping System Model » (CSM). L'une des singularités de ce nouveau système est l'existence d'un module de sol unique pour toutes les cultures disponibles dans DSSAT. Composé de 16 cultures dans sa version 4.0.2.0, DSSAT simule, sur une base journalière, non seulement le développement, la croissance et le rendement d'une culture pratiquée sur une unité de sol uniforme, mais aussi les changements au niveau du carbone, de l'azote et du contenu en eau du sol tout au long du cycle de développement de la plante. Parmi les modèles de culture retrouvés dans DSSAT version 4.0.2.0, CERES-Maize en est un. La description détaillée de la version originale de ce modèle de culture est fournie dans Jones et Kiniry (1986) et Richie et al. (1998). Dans le cadre de cette thèse, une description sommaire et ciblée de ce modèle est présentée. En plus d'une présentation générale sur la modélisation du développement de la culture du maïs-grain, du processus d'accumulation de biomasse et de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, cette description porte essentiellement sur les principales différences entre CERES-Maize 4.0.2.0 et les versions antérieures. Plus précisément, ces différences concernent certains paramètres clés de croissance et de rendement, notamment le facteur de réduction photosynthétique (PRFT), le taux relatif de remplissage des grains (RGFILL), l'efficacité dans l'utilisation du rayonnement solaire (RUE), le coefficient d'extinction pour la radiation photosynthétiquement active (EXT) et le calcul du nombre de grains par plantes (GPP).

### 6.1.1 Développement de la culture du maïs-grain

Le développement, défini tout simplement comme le changement des stades phénologiques de la plante, est divisé en 9 principales phases dans toutes les versions de CERES-Maize (Tableau 19).

Tableau 19 . Liste des stades phénologiques considérés dans CERES-Maize

| Numéro de phase dans le modèle | Durée de phase   |
|--------------------------------|--|
| 7                              | Jachère  |
| 8                              | Semis à germination  |
| 9                              | Germination à émergence  |
| 1                              | Émergence à fin du stade juvénile                                |
| 2                              | Fin du stade juvénile à initiation florale                       |
| 3                              | Initiation florale à fin développement des feuilles              |
| 4                              | Fin développement des feuilles à début de remplissage des grains |
| 5                              | Début de remplissage des grains à maturité physiologique         |
| 6                              | Maturité physiologique à récolte                                 |

Source : Jones et al., 1986 ; Jones et al., 2003

Le processus de développement ou l'initiation des différentes phases de développement du maïs-grain est grandement influencé par la variable température (Ritchie et al., 1998, Steduto 2008, 2009). Autrement dit, il existe une relation directe entre les stades de développement du maïs-grain et la température. À l'aide de cette relation, il est possible de prédire, avec un niveau de confiance variable, l'occurrence d'un stade phénologique

déterminé en se basant sur la somme des températures journalières. Cette somme de températures journalières, communément appelée temps thermique, est synthétisée à travers l'indicateur agroclimatique dénommé degré-jour de croissance (DJ). À ce niveau, il est important de signaler que le rythme de développement de la plante dépend également des facteurs spécifiques au cultivar, notamment ses coefficients génétiques. Indépendamment de la version, le modèle CERES-Maize considère 6 principaux coefficients génétiques, soit P1, P2, P5, G2, G3 et PHINT définis précédemment.

Les valeurs des coefficients P1, P5 et PHINT sont basées sur le calcul des DJ. La plus simple expression utilisée pour calculer les DJ est la suivante (Ritchie et al., 1998) :

$$DJ = ((T_{min} + T_{max}) \div 2) - T_b \quad (10)$$

avec :

$T_{min}$  : température minimale (°C)

$T_{max}$  : température maximale (°C)

$T_b$  : température de base en dessous de laquelle il n'y a aucun développement (°C)

À l'exception des phases 8 et 9 pour lesquelles une  $T_b$  de 10,0 °C est considérée, le calcul des DJ pour les autres phases est effectué avec une  $T_b$  de 8,0 °C (Jones and Kiniry, 1986). Le calcul des DJ est effectué directement à l'aide de la formule ci-dessus lorsque la température moyenne journalière ( $T_m$ ) possède une valeur située entre  $T_b$  et une température maximum seuil fixée à 34,0 °C. Si  $T_m$  est inférieure à  $T_b$  et si la température maximale est supérieure à 34,0 °C, huit interpolations de la température de l'air sont effectuées à l'aide d'un facteur de correction de température aux 3 heures afin de calculer le nombre de DJ pour la journée en question. Les formules utilisées lors de ces interpolations peuvent être consultées dans Jones et Kiniry (1986).



### 6.1.2 Production de biomasse végétale

En absence de certains facteurs limitants comme l'eau et les éléments nutritifs, les résultats de plusieurs études, notamment celles de Monteith (1977), Hesketh et Baker (1967) et Norman et Arkebauer (1991) ont révélé une relation linéaire entre le rayonnement solaire intercepté cumulé et la production de biomasse. Généralement, la valeur de la pente des droites de régression résultant de l'analyse de ces deux variables correspond à celle du potentiel de l'efficacité dans l'utilisation du rayonnement solaire (RUE). S'il est vrai que différentes plantes vont afficher, pour leur biomasse, une étroite relation linéaire avec le RUE, les valeurs de ce paramètre seront toutefois différentes (Teh, 2006). Compte tenu de sa simplicité, le concept RUE, défini comme la capacité d'une plante à convertir le rayonnement solaire en biomasse (Mavi et Tupper, 2004) a été retenu pour le calcul de la production de biomasse dans toutes les versions de CERES-Maize (Ritchie et al., 1998). Au niveau de toutes ces versions, le calcul de la production de biomasse est généralement effectué en deux étapes principales :

- **Calcul du potentiel de production de biomasse (PCARB) :** En l'absence de facteurs limitants, ce potentiel est calculé selon la formule suivante :

$$\text{PCARB} = \text{RUE} \times \text{IPAR} \quad (11)$$

avec :

PCARB : potentiel de production de biomasse ( $\text{g m}^{-2}$ )

RUE : efficacité dans l'utilisation du rayonnement solaire ( $\text{g MJ}^{-1}$ )

IPAR : RPA interceptée par la plante ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$$\text{IPAR} = \text{RPA} \times [1 - \exp(-\text{EXT} \times \text{LAI})] \quad (12)$$

avec :

RPA : Radiation photosynthétiquement active ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

EXT : coefficient d'extinction (sans dimension)

LAI : indice de surface foliaire (sans dimension)

- **Calcul de la biomasse journalière actuelle (CARBO) :** Inférieure ou égale à PCARB, CARBO tient compte de certains facteurs limitants. La quantité de CARBO produite est évaluée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{CARBO (g m}^{-2}\text{)} = \text{PCARB} \times \min (\text{PRFT, SWDF1, NDEF1, 1}) \quad (13)$$

avec :

min : indication de l'utilisation des valeurs minimales des paramètres cités entre parenthèses

PRFT (sans dimension): facteur de réduction photosynthétique ou de température

SWDF1 (sans dimension): facteur de déficit hydrique

NDEF1 (sans dimension): facteur de déficit en azote

Les valeurs de ces facteurs varient généralement entre 0 et 1, où 0 réfère à un déficit maximum et 1 n'indique aucune limitation.

### 6.1.3 Effet fertilisant du CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub> est l'un des principaux éléments qui rentrent dans la production de biomasse végétale. Une augmentation de sa concentration atmosphérique aura des conséquences sur les processus physiologiques des plantes, notamment ceux du maïs-grain, plante de type C<sub>4</sub>. En effet, toute augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> se traduira par des modifications de l'efficacité dans l'utilisation des ressources. L'ampleur et la direction de l'influence d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> sur les processus physiologiques des plantes, notamment ceux du maïs-grain, restent controversées en présence de facteurs limitants comme l'eau (Leakey et al., 2006; Bannayan et al., 2009) et selon le lieu de réalisation des expériences : essais en cabinets de croissance versus expérimentation en plein champ (Ainsworth, 2008 ; Long, 2006). Toutefois, plusieurs études ont révélé que ces

modifications dans l'utilisation des ressources seraient caractérisées par une réduction de la conductance stomatale et la transpiration, une amélioration du niveau d'efficacité dans l'utilisation de l'eau, une stimulation du taux de photosynthèse et une augmentation de l'efficacité dans l'utilisation du rayonnement solaire (Drake et al., 1996; Long, 1991, De Souza, 2008). Dans DSSAT, seuls les effets directs d'une augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  sur les processus de photosynthèse et de conductance stomatale sont considérés (Tsuji et al., 1994).

Le mécanisme par lequel les stomates répondent à une augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  n'est pas bien compris (Mott, 1990). Néanmoins, il est constaté qu'une augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  provoque généralement une fermeture des stomates. Cette réduction de l'ouverture et de la conductance des stomates se traduit généralement par une baisse du taux de respiration et de transpiration chez les plantes. Bien que la conductance stomatale soit réduite avec une concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  plus élevée, la photosynthèse n'est toutefois pas limitée. Cette situation s'explique par deux facteurs principaux :

- la non-saturation de la molécule réceptrice de  $\text{CO}_2$ , Rubisco (« Ribulose biphosphate-carboxylase/oxygenase ») pour les plantes en C3 ou Pyruvate pour les plantes en C4. Ces molécules sont responsables, entre autres, du processus de carboxylation au cours duquel le  $\text{CO}_2$  fixé est converti en sucres. Au taux actuel de concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$ , cette réaction de carboxylation n'est pas saturée (Drake et al., 1997).
- l'effet inhibiteur du  $\text{CO}_2$  sur le processus d'oxygénation dont le résultat final est une réduction de l'efficacité photosynthétique (Zelitch, 1973).

Il est important de noter que les processus de carboxylation et d'oxygénation sont grandement influencés par la température et la radiation solaire. En effet, avec une augmentation de

température et une forte irradiation, la solubilité du CO<sub>2</sub> par rapport à l'oxygène diminue ce qui se traduit par une baisse d'assimilation du CO<sub>2</sub> (Teh, 2006).

#### 6.1.4 Principales différences entre CERES 4.0.2.0 et les versions précédentes

Depuis la publication de la version originale de CERES-Maize en 1986, plusieurs modifications y ont été apportées. Les différences fondamentales entre la plus récente version de CERES-Maize, en l'occurrence la version 4.0.2.0 et les précédentes sont essentiellement aux six niveaux suivants (López-Cedrón, 2005):

- i. Facteur de réduction photosynthétique (PRFT): Variant entre 0 et 1, ce facteur est une fonction de la température journalière affectant l'efficience dans l'utilisation du rayonnement solaire. En absence de facteurs limitants (eau, éléments nutritifs) et sous une température optimale, PRFT est égal à 1 et RUE prend sa valeur maximale. Par contre si PRFT est égal à 0, RUE est nulle ce qui se traduit par une croissance nulle de la biomasse de la plante. Dans la version originale et celles de 2003 et 3.5 de CERES-Maize, PRFT est calculé de la façon suivante :

$$\text{PRFT} = 1,0 - 0,0025 ((0,25 \times \text{TMIN} + 0,75 \times \text{TMAX}) - 26,0)^2 \quad (14)$$

avec :

TMIN : température minimale (°C),

TMAX : température maximale (°C).

Le mode de calcul de PRFT dans les versions ci-haut mentionnées considère une fonction de température à deux points caractérisés par TMIN et TMAX. Par contre avec CERES-4.0.2.0, PRFT suit une fonction de température à 4 points, dont une température de base (6,2 °C), une première température optimale (16,5 °C), une seconde température optimale (33,0 °C) et une température maximale de 44,0 °C. La

figure 21 présente, pour différentes versions de CERES-Maize, la courbe de PRFT en fonction de la température moyenne durant les heures d'ensoleillement.

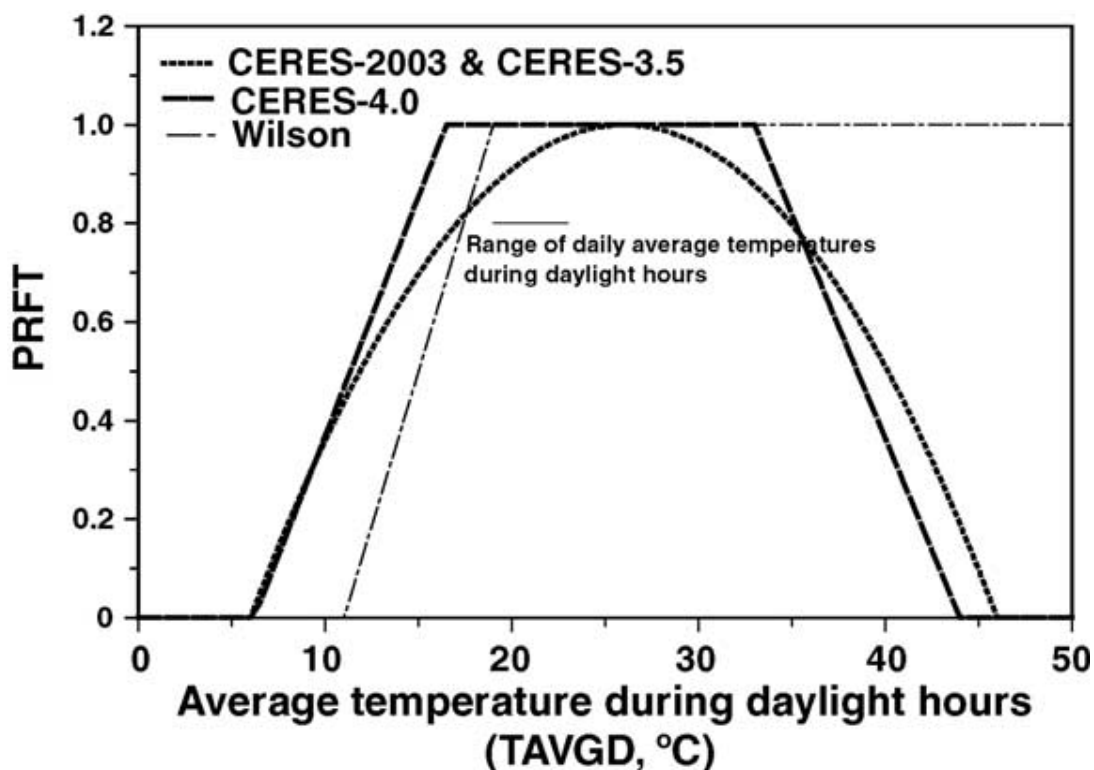


Figure 21. Fonctions de température affectant le facteur de réduction photosynthétique dans 3 versions de CERES-Maize

Source : Lòpez-Cedròn et al., 2005

- ii. Taux relatif de remplissage des grains (RGFILL, en mg/grain/jour) : De même que PRFT, RGFILL est une fonction de température calculée sous une base journalière. Il varie également entre 0 et 1. Dans le calcul de RGFILL, la version 4.0.2.0 de CERES-Maize, contrairement aux versions précédentes, considère une fonction de température moyenne journalière et linéaire avec 4 niveaux de température dont une température de base (5,5 °C), une première température optimale de 16,0 °C, une seconde température optimale de 39 °C et une température maximale de 48,5 °C. La plage de température optimale pour RGFILL est plus grande pour la fonction de température considérée dans CERES-Maize 4.0.2.0 (voir figure 22).

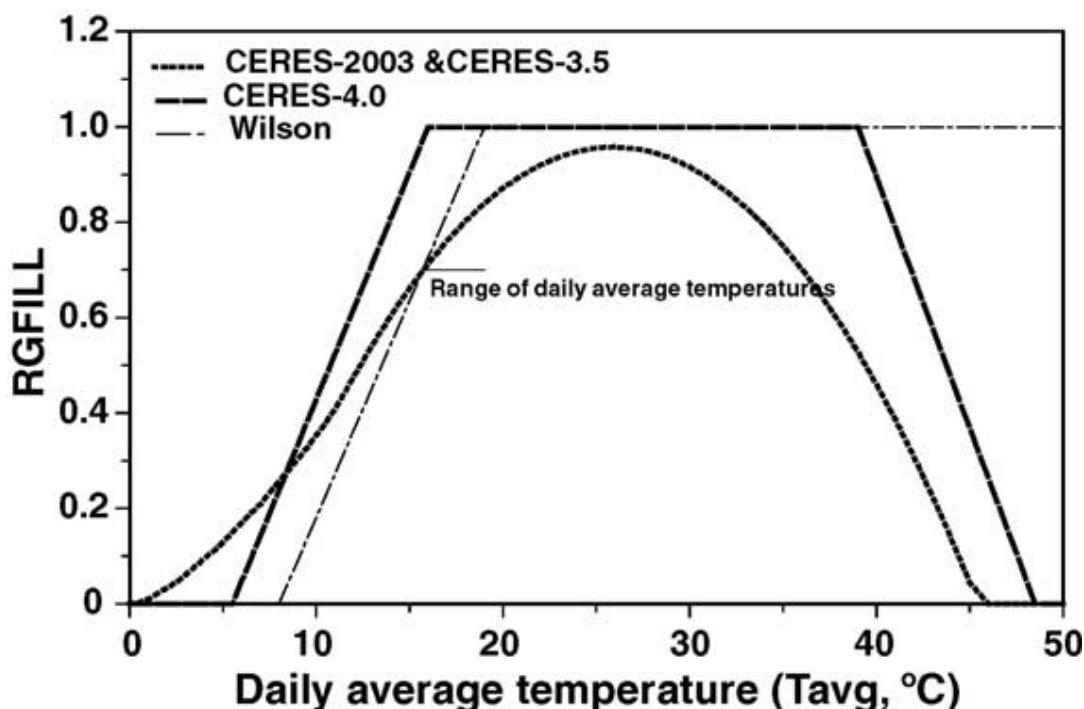


Figure 22. Fonctions de température affectant le taux de remplissage des grains dans 3 versions de CERES-Maize

Source : Source : López-Cedrón et al., 2005

- iii. Efficience dans l'utilisation du rayonnement solaire (RUE) : À l'exception de CERES-2003 qui considère que RUE est fonction du déficit de pression de vapeur (VPD) dont la formule de calcul peut être retrouvée dans Stockle et Kiniry (1990), les autres versions de CERES-Maize, notamment CERES-Maize 4.0.2.0, représentent RUE comme une constante. Dans les versions CERES-3.5 et CERES-Maize 4.0.2.0, RUE est égale à  $4,2 \text{ g MJ}^{-1}$ , tandis qu'elle équivaut à  $4,5 \text{ g MJ}^{-1}$  au niveau de la version originale.
- iv. Coefficient d'extinction de la radiation photosynthétiquement active (EXT)): Contrairement à la version originale et la version CERES-2003 où EXT est une constante estimée à 0,65, CERES-Maize 4.0.2.0, à l'instar de la version CERES-3.5, considère que le paramètre EXT est une fonction de la distance entre les rangées

(ROWSPC, en cm) et la densité de plantation (PLTPOP, en plants/m<sup>2</sup>). Pour les versions CERES-3.5 et CERES-Maize 4.0.2.0, le calcul de EXT est effectué à l'aide de la formule suivante :

$$\text{EXT} = 1,5 - 0,768 ((\text{ROWSPC} \times 0,01)^2 \times \text{PLTPOP})^{0,1} \quad (15)$$

- v. Efficience dans la conversion de la matière sèche aux grains : Les différentes versions de CERES-Maize débutent le transfert de la matière sèche aux grains lorsque la production de biomasse actuelle par plante (CARBO, en g m<sup>-2</sup>) est inférieure à la croissance journalière du grain (GROGRN, en g). Toutefois, l'augmentation du poids du grain suite à une perte de biomasse au niveau de la tige varie entre les différentes versions du modèle.
- vi. Calcul du nombre de grains par plante (GPP) : Si pour la version CERES-2003, GPP est uniquement fonction du taux moyen de photosynthèse entre les périodes d'apparition des soies et du début de remplissage des grains (PSKER, sans dimension), pour les versions CERES-3.5 et CERES 4.0.2.0, il est à la fois fonction de PSKER et de G2 (défini au niveau des différents coefficients génétiques considérés par les différentes versions du modèle). Pour les versions CERES-3.5 et CERES 4.0.2.0, GPP peut être obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$\text{GPP} = ((\text{G2} \times \text{PSKER}) \div 7200) + 50 \quad (16)$$

## 6.2 Description de la technique du Processus d'analyse hiérarchique

Développé par Saaty en 1977, le PAH est une technique d'analyse multicritère dont les principaux objectifs sont de faciliter certains processus de prises de décisions et de favoriser l'atteinte de consensus au sein d'un groupe (Vaidya et Kumar, 2006). Capable d'intégrer simultanément les aspects tangibles et intangibles (Okada et al., 2008), cette technique consiste à diviser un problème relativement complexe en certains éléments plus simples répartis sur plusieurs niveaux, constituant ainsi une hiérarchie (Alphonse, 1997; Tran et al.,

2004; Aras et al., 2004). Au niveau supérieur de la hiérarchie se trouve l'objectif global du processus de décision tandis que les critères, les sous critères et les alternatives figurent aux niveaux descendants. Plusieurs méthodes ou techniques sont utilisées afin d'identifier les critères à considérer dans le processus d'analyse. La technique ou la méthode à adopter est souvent guidée par le contexte spécifique au processus de prises de décision. Toutefois, il est recommandé de limiter à 9 le nombre de critères à considérer (Saaty, 1977). Une fois construite la hiérarchie, afin d'arriver à établir un ordre de priorité pour les différents critères et statuer sur l'alternative la plus appropriée, les étapes suivantes sont généralement effectuées :

- e) Comparaison de paires de critères et d'alternatives par rapport à l'objectif principal et aux critères. Cette comparaison est effectuée à l'aide d'une échelle comparative dont les valeurs varient entre 1 et 9 (Tableau 20).
- f) Construction d'une matrice à partir des comparaisons des paires d'éléments pour chaque niveau de la hiérarchie. Dans le cadre de la thèse, lors des entrevues avec les producteurs agricoles, une partie de la matrice a été remplie, car l'autre moitié était les valeurs réciproques de la partie remplie. Pour celle-ci, les producteurs agricoles accordaient, pour chaque paire de critères, une valeur selon une échelle comparative de critères. En effet, la matrice  $n \times n$  qui résultait des données collectées lors des enquêtes est exprimée mathématiquement de la façon suivante :



$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & . & . & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & . & . & a_{2n} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ a_{n1} & a_{n2} & . & . & a_{nn} \end{bmatrix}$$

La valeur qui résulte de la comparaison de l'élément  $i$  avec l'élément  $j$  est placée à la position de  $a_{ij}$  tel qu'indiqué dans la matrice ci-dessus. Sa valeur réciproque est située de l'autre côté de la diagonale de la matrice et prend la position  $a_{ji}$ .

g) Calcul d'un vecteur propre représentant l'ordre d'importance des critères ou des alternatives à la suite de l'obtention d'une valeur moyenne des rangées de la matrice  $n \times n$  résultant tout d'abord d'une somme de ses différentes colonnes et d'une division de chaque élément de la matrice par le total de leur colonne respective.

h) Calcul d'un ratio de cohérence (RC, sans dimension). Celui-ci est obtenu à

$$\text{l'aide de la formule suivante : } RC = IC \div IA \quad (17)$$

$$IC (\text{indice de cohérence, sans dimension}) = (\lambda_{\max} - n \div n - 1) \quad (18)$$

$\lambda_{\max}$  : est obtenu en trois étapes principales, soit i) la multiplication de chaque valeur des colonnes par la priorité du critère, ii) la division des éléments du vecteur de la somme pondérée par la priorité correspondant à chaque critère et iii) la moyenne des valeurs obtenues à l'étape précédente

$n$  : le nombre de critères considérés dans le processus d'analyse

IA (sans dimension): index de cohérence d'une matrice de comparaison des paires aléatoirement générées.

Si  $RC > 0,10$ , le niveau d'incohérence est jugé trop élevé et il est recommandé de reprendre le processus à la case de départ. Ces calculs ont été systématiquement automatisés à l'aide de l'utilisation de la version 11.5 du logiciel Expert Choice (2007).

Tableau 20. Échelle comparative des jugements utilisée dans le PAH

| Niveau d'importance ou d'influence | Jugement verbal                                       |
|------------------------------------|---|
| 1                                  | Importance ou influence égale                         |
| 3                                  | Modérément plus important ou plus influent            |
| 5                                  | Fortement plus important ou plus influent             |
| 7                                  | Très fortement plus important ou plus influent        |
| 9                                  | Extrêmement plus important ou plus influent           |
| 2, 4, 6 et 8                       | Valeurs intermédiaires demandant un certain compromis |

Le PAH est fondé sur certains axiomes dont les principaux éléments peuvent être résumés comme suit (Alphonse, 1997) :

- a) Réciprocité : si l'élément X est préféré n fois que l'élément Y, ce dernier est donc  $1/n$  fois préféré que X.
- b) Homogénéité : comparer ce qui est comparable.
- c) Dépendance : comparaison d'un niveau inférieur se fait en fonction de l'élément situé à un niveau supérieur.

- d) Attentes ou prévisions : tout changement dans la structure de la hiérarchie impliquera de nouvelles évaluations des priorités ou des préférences.

## **Chapitre 7.        RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Ce chapitre présente, pour les deux régions agricoles retenues, les résultats et la discussion relatifs aux différents niveaux de vulnérabilités des fermes productrices de maïs-grain aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression. La présentation des résultats principaux de cette étude est accompagnée autant que possible d'une comparaison avec ceux obtenus dans d'autres études. Contrairement aux cadres conceptuels, les études de vulnérabilité du secteur agricole aux variabilités et changements climatiques sont généralement rares et voire quasi inexistantes à l'échelle des municipalités et pour un groupe particulier de producteurs agricoles (Eakin et al., 2008; Neil et al., 2008; Polsky et al., 2007). Par conséquent, la comparaison avec les résultats d'autres études ne se fait que pour certaines composantes du concept de vulnérabilité, notamment la sensibilité des rendements du maïs-grain aux variabilités et changements climatiques et les déterminants de capacité adaptative. La présentation des résultats de l'étude est organisée par période d'analyse, en l'occurrence la période de référence et la période future.

Pour la période de référence (1985-2005) et pour toutes les municipalités productrices de maïs-grain des deux régions agricoles dont les données de rendements et de superficies étaient disponibles, les résultats des deux profils de vulnérabilités, notamment les vulnérabilités aux conditions climatiques et aux facteurs socio-économiques, sont présentés. La présentation du profil de vulnérabilité aux conditions climatiques pour les municipalités de chacune des deux régions est effectuée et suivie de celle du profil de vulnérabilité des mêmes municipalités aux conditions socio-économiques. Les niveaux de vulnérabilité multiple résultant de la combinaison des deux types de profil sont ensuite indiqués. La présentation des résultats des niveaux de vulnérabilités pour la période de référence est suivie d'une analyse de l'évolution ou de la variation des rendements du maïs-grain pour les trois municipalités dont la vulnérabilité future est également évaluée. Cette analyse de l'évolution ou de la variation

des rendements est essentiellement effectuée en fonction des UTM. Cette analyse des rendements pour les trois municipalités retenues est suivie de la présentation des résultats touchant la capacité adaptative du secteur. Celle-ci fait également l'objet d'analyse comparative entre les régions et entre les municipalités d'une même région. Cette dernière comparaison est effectuée uniquement pour la Montérégie-Ouest pour les raisons évoquées au niveau de la méthodologie. La présentation des résultats pour la période de référence se termine par une description des principaux facteurs considérés dans le processus d'allocation des cultures sur les différentes parcelles constituant les fermes agricoles.

Pour la période future, les résultats débutent avec la présentation des scénarios de capacité adaptative pour les trois municipalités retenues. Ces scénarios sur la capacité adaptative pour la période de référence sont suivis de ceux relatifs aux valeurs de CV pour les superficies en maïs-grain. Ensuite, les impacts des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain résultant des simulations effectuées à l'aide du modèle CERES-Maize 4.0.2.0 de DSSAT sont présentés. Pour ces impacts, deux niveaux de résultats sont présentés : 1) les impacts des changements climatiques sur le potentiel de rendement du maïs-grain et 2) les impacts des changements climatiques sur le rendement limité par l'eau. Pour ce dernier type de rendement considéré dans l'évaluation des niveaux de vulnérabilité, des analyses bivariées sont réalisées pour certaines variables climatiques clés. La présentation des résultats relatifs aux impacts des changements climatiques sur les rendements est suivie de celle des niveaux de vulnérabilité des fermes productrices des maïs-grain pour les trois municipalités retenues. Ces niveaux de vulnérabilités sont présentés aussi bien pour les différents scénarios de capacité adaptative, de variation de CV des superficies, que pour les rendements simulés selon les différents scénarios climatiques, les types de cultivars et les concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> considérés. Finalement, les résultats d'une

comparaison des niveaux de vulnérabilité des trois municipalités pour les deux périodes d'étude sont présentés.

### **7.1 Vulnérabilité aux conditions climatiques pour la période de référence**

Comme indiqué préalablement, pour la période de référence (1985-2005), la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des municipalités des deux régions agricoles aux conditions climatiques est appréciée à travers les valeurs de CV des séries temporelles de rendements. Avant d'aborder les niveaux de vulnérabilité aux conditions climatiques, il semble opportun de dresser un portrait des rendements observés disponibles pour les deux régions agricoles. Pour la région agricole de Montérégie-Ouest prise dans son intégralité, la description des rendements moyens observés (une moyenne des rendements a été effectuée pour les différentes municipalités de la Montérégie-Ouest) est présentée à la figure 23. En plus d'une valeur médiane de 6865 kg/ha et des valeurs de 6344 kg/ha et 7211 kg/ha pour les 25e et 75e percentiles, respectivement, la figure 23 indique des valeurs moyennes de rendement variant entre un minimum de 3986 kg/ha (la valeur déviante n'a pas été considérée dans l'analyse) pour la municipalité de Notre-Dame-du-Mont-Carmel et un maximum de 8056 kg/ha pour la municipalité de Noyan. Ces deux municipalités font partie de la MRC du Haut-Richelieu. Si l'intervalle global pour ces valeurs moyennes de rendement est de 4070 kg/ha, celle des interquartiles est de 867 kg/ha. Le rendement moyen pour la région agricole de Montérégie-Ouest est évalué à de 6769 kg/ha, et l'écart-type est de 652 kg/ha.

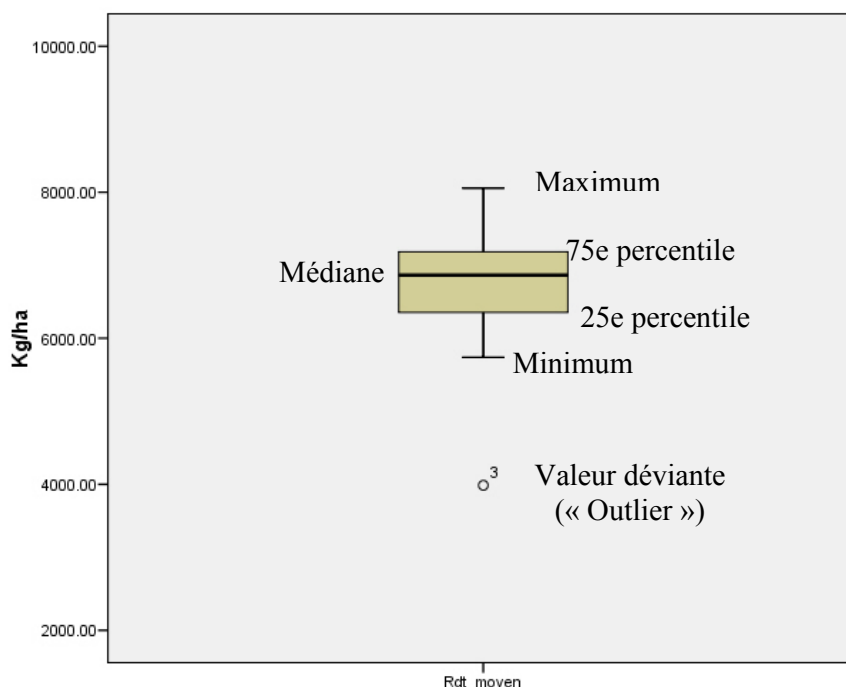


Figure 23. Description des données de rendements moyens (Rdt\_moyen) de maïs - grain pour la Montérégie-Ouest, 1985-2005

Les valeurs de rendements moyens pour les différentes municipalités de la Montérégie-Ouest ont été regroupées en 3 niveaux de rendements : faible, moyen et élevé. Cette catégorisation des rendements moyens a été effectuée en tenant compte des valeurs des 25e et 75e percentiles. En effet, les valeurs moyennes de rendement inférieures au 25e percentile (6207 kg/ha) étaient qualifiées de faibles, celles comprises entre les 25e et 75e percentiles (6207-7207 kg/ha) constituaient le niveau de rendement moyen, tandis que celles supérieures au 75e percentile (7207 kg/ha) étaient considérées comme faisant partie du niveau de rendement élevé. La figure 24 présente les différents niveaux de rendement pour la région agricole de Montérégie-Ouest. Dans l'ensemble, la majorité des municipalités de la région se retrouve dans la classe des rendements moyens. Toutefois, l'observation de la figure 24 semble indiquer une certaine tendance à la polarisation des niveaux de rendements faible et élevé. En effet, les municipalités dont les niveaux de rendement sont qualifiés de faible se retrouvent dans la plupart des cas au sud de la région et plus précisément au niveau de la

MRC du Haut-St-Laurent, tandis que celles avec les niveaux de rendement élevé sont localisées à l'est de la région et particulièrement au niveau de la MRC du Haut-Richelieu.

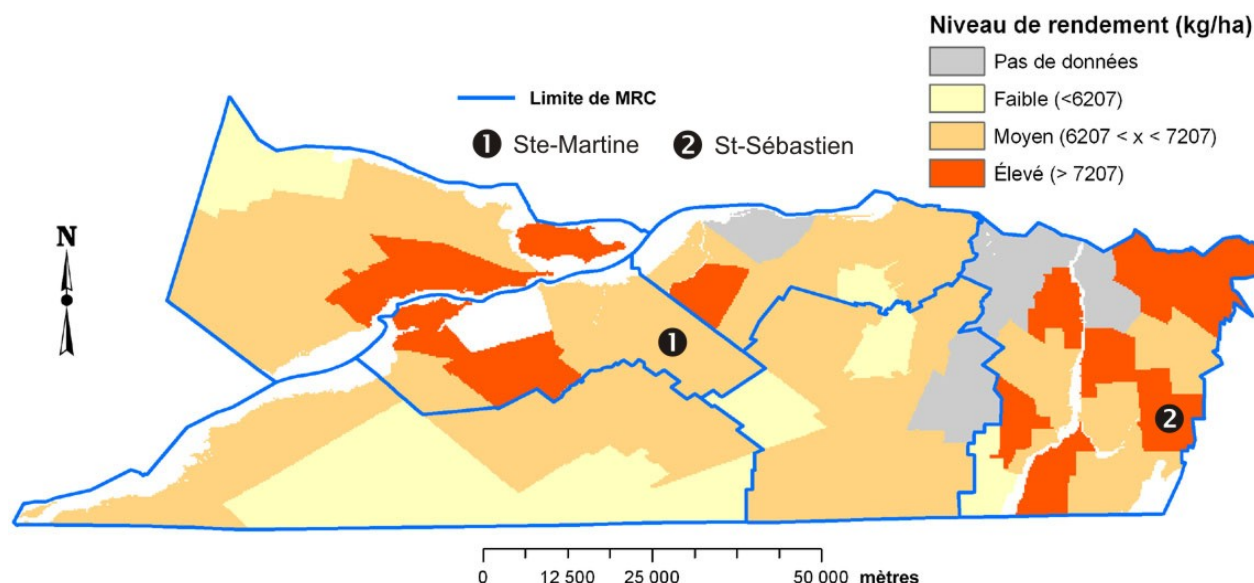


Figure 24. Carte des catégories de rendement du maïs-grain en Montérégie-Ouest, 1985-2005

À l'échelle des MRC, il existe une certaine hétérogénéité au niveau des rendements observés. En effet, comme indiqué à la figure 25, les valeurs médianes des séries de rendements sont différentes d'une MRC à l'autre. En outre, en observant la figure 25, il est possible de constater une distribution assez hétérogène des données autour des 25e et 75e percentiles. Par ailleurs, si la MRC du Haut-Richelieu affiche le rendement médian le plus élevé, on y retrouve toutefois les valeurs de rendements extrêmes très faibles. Le rendement médian le plus faible est enregistré au niveau de la MRC du Haut-St-Laurent.



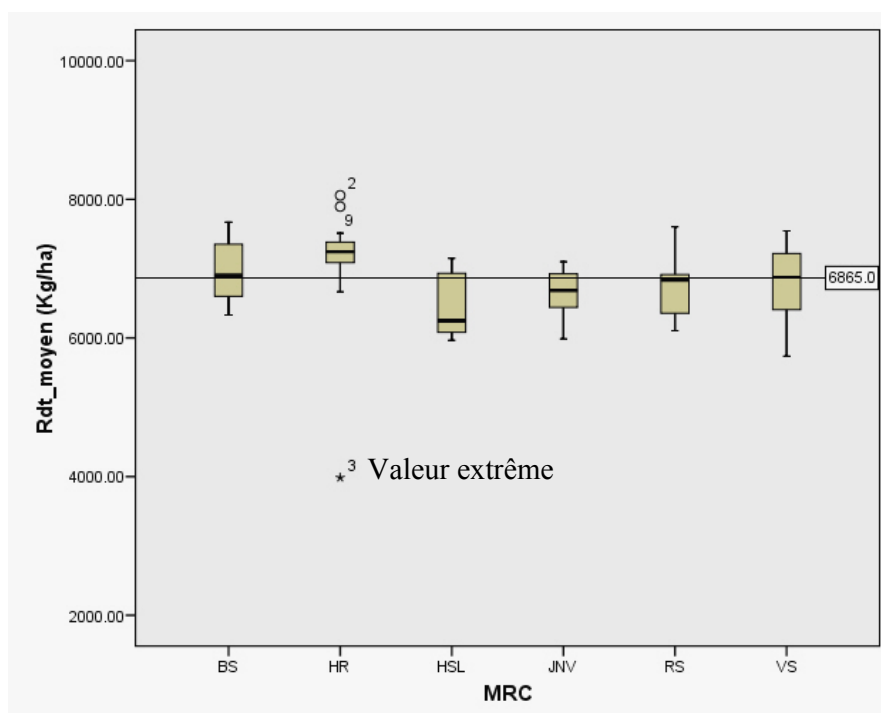


Figure 25. Description des séries de rendements à l'échelle des MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005 (BS : Beauharnois-Salaberry; HR : Haut-Richelieu; HSL : Haut-St-Laurent; JNV : Jardins-de-Napierville; RS : Roussillon; VS : Vaudreuil-Soulanges)

Les rendements moyens par MRC sont présentés à la figure 26. Celle-ci indique que la MRC dont le rendement moyen est le plus élevé correspond au Haut-Richelieu, soit 7053 kg/ha. La MRC du Haut-St-Laurent accuse, par contre le rendement moyen le plus faible, soit 6482 kg/ha. Des 6 MRC constituant la Montérégie-Ouest, trois d'entre elles affichent des rendements moyens inférieurs à la moyenne de la région agricole. Ces trois MRC sont Roussillon (6726 kg/ha), les Jardins-de-Napierville (6603) et le Haut-St-Laurent (6482 kg/ha).

Pour apprécier la signification statistique des différences constatées entre les rendements moyens des MRC, le test de Mann-Whitney, un test non paramétrique (c'est-à-dire un test qui n'exige aucune hypothèse sur les paramètres de distribution des données et aucune hypothèse sur le type de distribution des données) pour deux échantillons indépendants a été effectué. Les résultats de ce test présentés au tableau 21 révèlent que, à l'exception de la comparaison des deux paires de rendements moyens de Haut-

Richelieu/Jardins-de-Napierville et Haut-Richelieu/Haut-St-Laurent, il n'existe pas, pour  $\alpha = 0,05$ , de différences statistiquement significatives entre les rendements moyens des MRC.

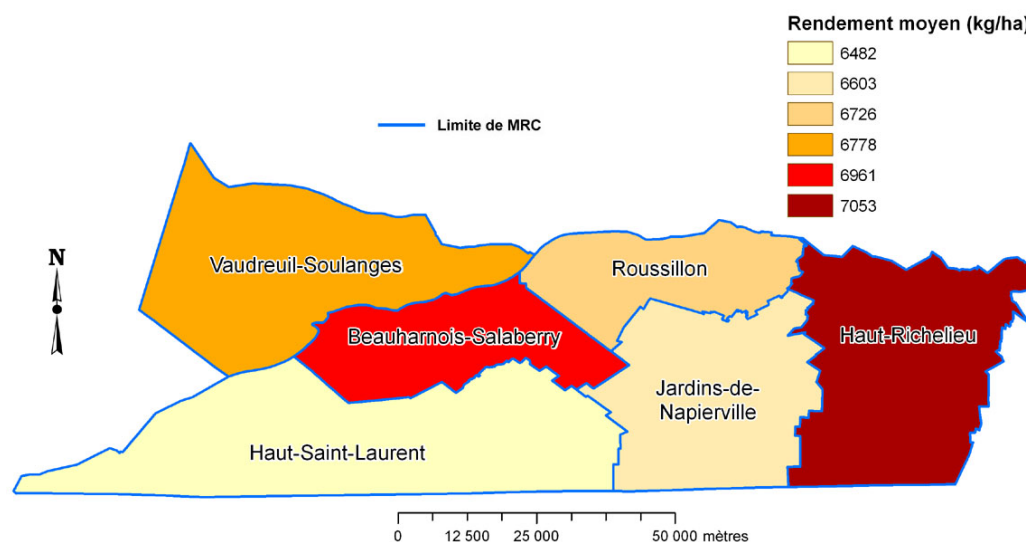


Figure 26. Carte de rendements moyens du maïs-grain par MRC pour la Montérégie-Ouest, 1985-2005

Tableau 21. Signification statistique des différences de moyennes de rendement du maïs-grain pour les MRC de la Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

| MRC                           | Test de Mann-Whitney, $\alpha = 0,05$ |       |               |               |       |       |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------|---------------|---------------|-------|-------|
|                               | HR                                    | Rs    | JNV           | HSL           | BS    | VS    |
| <b>Haut-Richelieu</b>         |                                       | 0,063 | <b>0,007*</b> | <b>0,003*</b> | 0,293 | 0,099 |
| <b>Roussillon</b>             |                                       |       | 0,791         | 0,390         | 0,475 | 0,684 |
| <b>Jardins-de-Napierville</b> |                                       |       |               | 0,569         | 0,238 | 0,382 |
| <b>Haut-St-Laurent</b>        |                                       |       |               |               | 0,070 | 0,200 |
| <b>Beauharnois-Salaberry</b>  |                                       |       |               |               |       | 0,421 |

\* Différence significative

Les valeurs de CV pour les rendements observés sont synthétisées dans la figure 27. Avec une valeur moyenne et médiane de 0,23, les valeurs de CV des rendements de maïs-grain pour les différentes municipalités de la Montérégie-Ouest varient entre 0,14 et 0,40. Ces deux valeurs de CV sont enregistrées au niveau de la MRC du Haut-Richelieu. Les 25e et 75e percentiles des CV des rendements de maïs-grain sont évalués à 0,20 et 0,27, respectivement. En comparant le nombre de valeurs de part et d'autre de ces percentiles, la figure indique l'existence d'un plus grand nombre de municipalités dont les CV sont supérieurs à celui du 75e percentile.

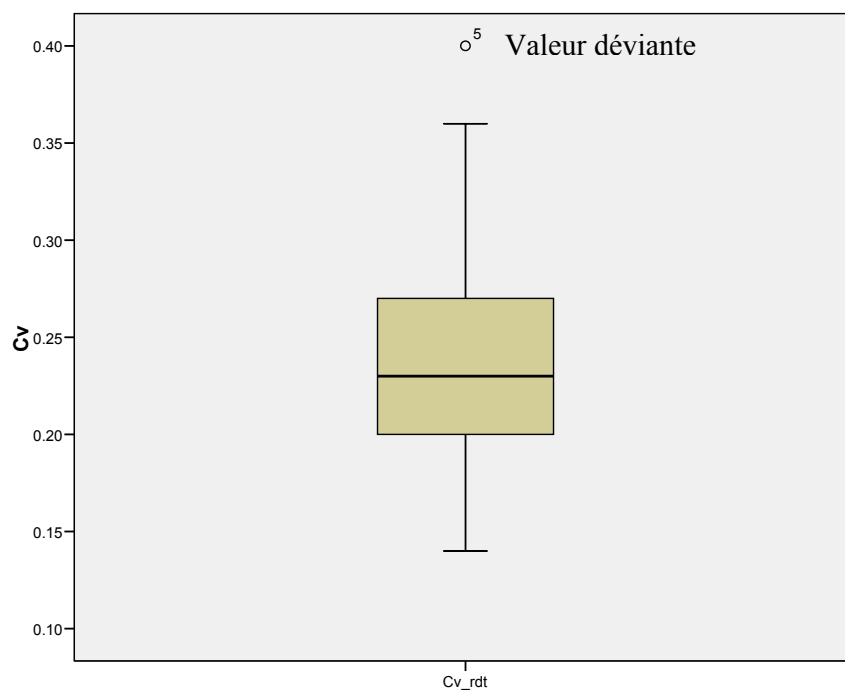


Figure 27. Description des CV des rendements (Cv\_rdt) de maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005

Une reclassification des différentes valeurs de CV basée sur les valeurs des 25e et 75e percentiles a permis de réaliser une typologie des niveaux de vulnérabilité des différentes municipalités de la région aux conditions climatiques. Trois niveaux de vulnérabilité ont été effectués : niveau de vulnérabilité faible (CV des rendements inférieur au 25e percentile évalué à 0,20), niveau de vulnérabilité moyenne (CV des rendements compris entre les 25e et

75e percentiles, soit entre 0,20 et 0,27) et niveau de vulnérabilité élevée (CV des rendements supérieur à 0,27). Les résultats issus de la reclassification des différentes valeurs de CV sont présentés à la figure 28. L'analyse de celle-ci permet de constater que la majorité des municipalités avec une vulnérabilité élevée aux conditions climatiques sont situées au sud de la région agricole de Montérégie-Ouest et plus précisément au niveau des MRC du Haut-St-Laurent et des Jardins-de-Napierville. L'appartenance des différentes municipalités aux trois niveaux de vulnérabilité est indiquée au tableau 22. Sur un total de 56 municipalités pour lesquelles on disposait d'une série de données sur les rendements, près de la moitié d'entre elles (25) fait partie de la classe de vulnérabilité moyenne. Le nombre de municipalités appartenant à la classe de vulnérabilités faible et forte était de 18 et 13, respectivement. Il est important de noter que les deux municipalités (Sainte-Martine et Saint-Sébastien) de la Montérégie-Ouest retenues pour d'autres analyses au cours de la période future sont classées parmi celles avec un niveau de vulnérabilité moyenne aux conditions climatiques.

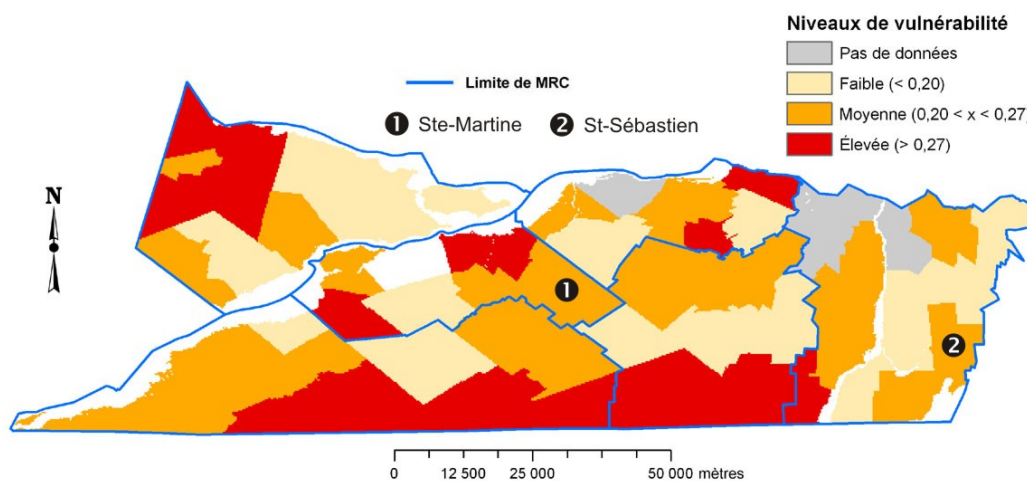


Figure 28. Carte de typologie de vulnérabilité des municipalités de la Montérégie-Ouest aux conditions climatiques au cours de la période 1985-2005

Tableau 22. Distribution des municipalités de Montérégie-Ouest selon les classes de vulnérabilité aux conditions climatiques pour la période de référence, 1985-2005

| Niveaux de vulnérabilité aux conditions climatiques | Nom des municipalités   | Nombre de municipalités |
|---|---|-------------------------|
| Faible  | Noyan, Henryville, Ormstown, Ste-Barbe, St-Patrice-de-Sherrington, Ste-Clotilde-de-Chateauguay, St-Louis-de-Gonzague, St-Cyprien-de-Napierville, Ste-Anne-de-Sabrevois, St-Alexandre, Mercier, St-Isidore, St-Polycarpe, Les Cèdres, Ste-Brigitte-d'Iberville, St-Philippe, Notre-Dame-de-l'Île-Perrot, Vaudreuil-Dorion  | 18                      |
| Moyen   | Dundee, St-Georges-de-Clarenceville, Godmanchester, St-Chrysostome, St-Anicet, St-Paul-de-l'Île-aux-Noix, St-Valentin, Saint-Sébastien, Très-St-Sacrement, St-Étienne-de-Beauharnois, St-Blaise-sur-Richelieu, Salaberry-de-Valleyfield, St-Michel, St-Édouard, Sainte-Martine, St-Rémi, St-Jacques-Le-Mineur, St-Télésphore, St-Jean-sur-Richelieu, Coteau-du-Lac, St-Clet, Mont-St-Grégoire, Chateauguay, St-Constant, Très-St-Rédempteur | 25                      |
| Élevé   | Elgin, Havelock, Hinchinbrooke, St-Bernard-de-Lacolle, Notre-Dame-du-Mont-Carmel, Hemmingford, St-Stanislas-de-Kostka, Beauharnois, St-Mathieu, Ste-Justine-de-Newton, La Prairie, Ste-Marthe, Rigaud   | 13                      |

La figure 29 résume les informations relatives à la distribution des CV à l'échelle des MRC. Une valeur déviante de CV peut être constatée pour la MRC du Haut-Richelieu.

Toutefois, cette MRC possède le CV médian le plus faible ainsi que la plus faible valeur de CV. Si l'on excepte la valeur déviante du Haut-Richelieu, les plus fortes valeurs de CV sont enregistrées au niveau des MRC du Haut-St-Laurent et de Vaudreuil-Soulanges.

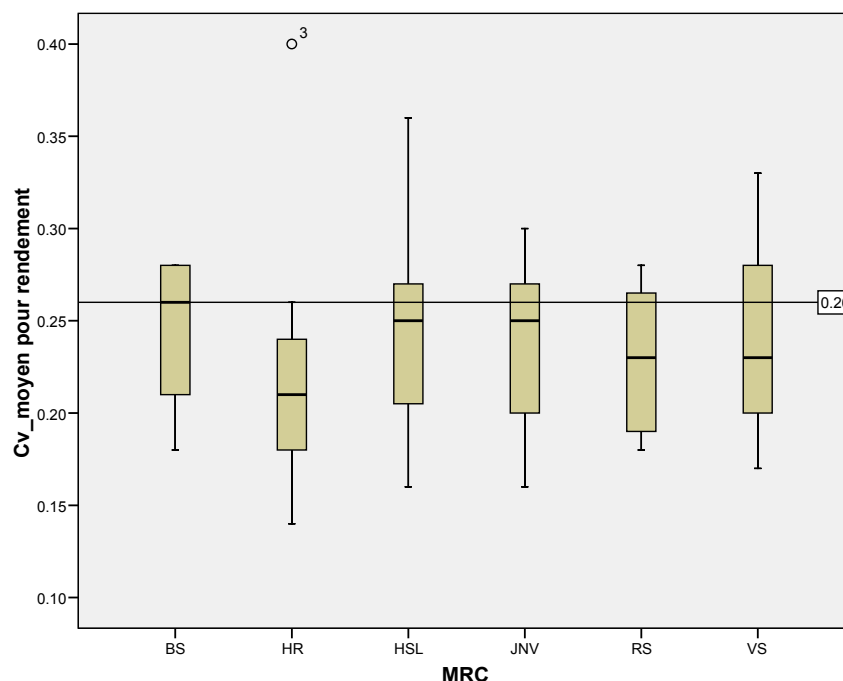


Figure 29. Distribution des valeurs de CV moyens des rendements du maïs-grain par MRC pour la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005  
(BS : Beauharnois-Salaberry; HR : Haut-Richelieu; HSL : Haut-St-Laurent; JNV : Jardins-de-Napierville; RS : Roussillon; VS : Vaudreuil-Soulanges)

À la figure 30 sont présentés les CV moyens des rendements par MRC. L'écart entre les CV moyens maximum et minimum par MRC est relativement petit, soit 0,03. En croisant les données moyennes de rendements et de CV de rendements par MRC (Tableau 23), les deux points suivants méritent d'être signalés :

- la MRC du Haut-Richelieu affiche le rendement moyen le plus élevé, mais le plus faible CV moyen pour le rendement,
- la MRC de Beauharnois-Salaberry, bien qu'elle ait été classée 2e en termes de rendements moyens, possède la plus forte valeur de CV moyen pour le rendement.

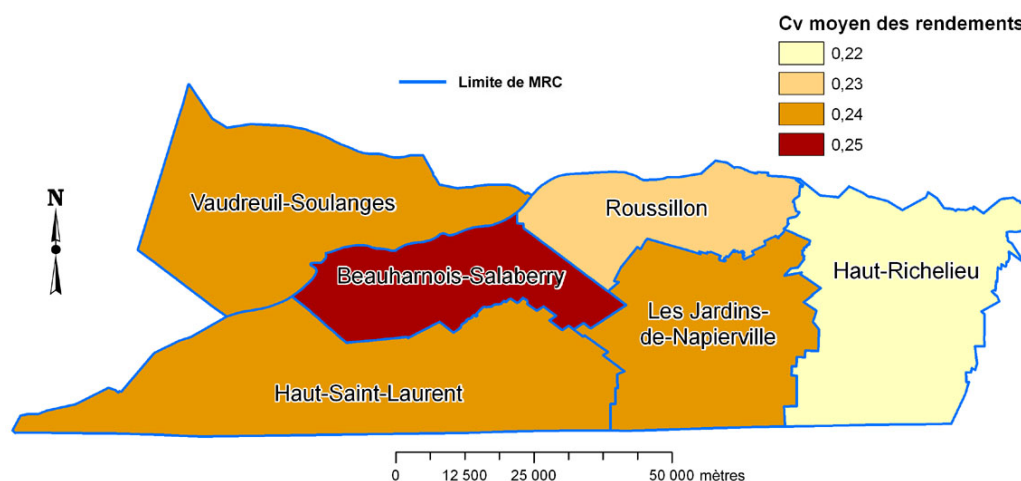


Figure 30. Carte de CV moyens des rendements de maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005

Tableau 23. Comparaison des rendements et des CV moyens des rendements de maïs-grain entre les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période de référence, 1985-2005

| MRC                    | Rendement moyen (kg/ha) | CV moyen |
|------------------------|-------------------------|----------|
| Haut-Richelieu         | 7053                    | 0,22     |
| Roussillon             | 6726                    | 0,23     |
| Jardins-de-Napierville | 6603                    | 0,24     |
| Haut-St-Laurent        | 6482                    | 0,24     |
| Beauharnois-Salaberry  | 6961                    | 0,25     |
| Vaudreuil-Soulanges    | 6678                    | 0,24     |

Le test non paramétrique de Mann-Whitney a été également effectué pour les valeurs moyennes de CV pour les rendements afin d'apprécier la signification statistique des différences observées au niveau de ces valeurs. Les résultats de ce test sont présentés au tableau 24. Contrairement aux rendements moyens, pour  $\alpha = 0,05$ , il n'existe aucune différence statistiquement significative entre les valeurs moyennes de CV des rendements pour les 6 MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest.

Tableau 24. Signification statistique des différences de moyennes de CV de rendement du maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

| MRC                    | Test de Mann-Whitney, $\alpha = 0.05$ |            |                        |                 |                       |                     |
|------------------------|---------------------------------------|------------|------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
|                        | Haut-Richelieu                        | Roussillon | Jardins-de-Napierville | Haut-St-Laurent | Beauharnois-Salaberry | Vaudreuil-Soulanges |
| Haut-Richelieu         |                                       | 0,498      | 0,269                  | 0,234           | 0,134                 | 0,309               |
| Roussillon             |                                       |            | 0,831                  | 0,648           | 0,511                 | 0,682               |
| Jardins-de-Napierville |                                       |            |                        | 0,878           | 0,634                 | 0,849               |
| Haut-St-Laurent        |                                       |            |                        |                 | 0,761                 | 0,947               |
| Beauharnois-Salaberry  |                                       |            |                        |                 |                       | 0,801               |

Pour la région du Lac-St-Jean-Est, les données sur les rendements de maïs-grain étaient uniquement disponibles pour deux municipalités, en l'occurrence Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et Hébertville. Il est donc impossible d'adopter le même format de présentation des résultats suivi pour la région agricole de Montérégie-Ouest. Toutefois, des valeurs moyennes de rendements et de CV des rendements sont présentées pour la MRC du Lac-St-Jean-Est, notamment pour ses deux municipalités préalablement mentionnées. Entre 2000 et 2005, le rendement moyen pour la région du Lac-St-Jean-Est est évalué à 4246 kg/ha, avec un minimum de 4034 kg/ha pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et un maximum de 4458 kg/ha pour la municipalité d'Hébertville. Avec une valeur de 0,831 du test de Mann-Whitney pour  $\alpha = 0,05$ , il n'existe pas de différence significative entre les rendements de maïs-grain pour ces deux municipalités. Le rendement moyen des



municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest est plus élevé que celles de Lac-St-Jean-Est. En effet, il existe un écart de plus de 2000 kg/ha entre les deux régions.

En ce qui concerne les CV des rendements, la valeur moyenne pour la MRC de Lac-St-Jean-Est est de 0,35, avec un minimum de 0,13 pour la municipalité d'Hébertville et un maximum de 0,57 pour celle de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Contrairement à la région agricole de Montérégie-Ouest, il est inapproprié d'utiliser les valeurs des percentiles de CV pour réaliser une typologie des niveaux de vulnérabilité des municipalités de la MRC de Lac-St-Jean-Est. Pour celles-ci, la typologie est plutôt basée sur le CV moyen pour la région. Ainsi, la municipalité d'Hébertville avec un CV moyen de 0,13 est considérée comme ayant une vulnérabilité faible aux conditions climatiques, tandis que la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, avec un CV moyen de 0,57, se retrouve au niveau de la classe de vulnérabilité élevée. Avec un CV moyen de 0,35, les fermes productrices de maïs-grain de Lac-St-Jean-Est possèdent une vulnérabilité plus élevée aux conditions climatiques que celles de la région agricole de Montérégie-Ouest dont le CV moyen est de 0,23. En dehors du nombre d'années de données relativement faible, cette situation pourrait s'expliquer essentiellement par des conditions climatiques moins favorables (notamment une occurrence plus fréquente de gels hâtifs) pour la région du Lac-St-Jean-Est comparativement à celle de la Montérégie-Ouest.

En matière de vulnérabilité aux conditions climatiques pour la période de référence et sur la base des CV de rendements en maïs-grain, plusieurs aspects importants méritent d'être mentionnés. À l'échelle des régions agricoles :

- La Montérégie-Ouest est moins vulnérable que le Lac-St-Jean-Est

Entre les deux municipalités de la Montérégie-Ouest retenues pour les analyses futures :

- La municipalité de Sainte-Martine est plus vulnérable que celle de Saint-Sébastien.

Entre les municipalités du Lac-St-Jean-Est :

- La municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan est plus vulnérable que celles d'Hébertville.

## **7.2 Vulnérabilité aux facteurs socio-économiques pour la période de référence**

La vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain aux conditions socio-économiques est appréciée à l'aide des valeurs de CV pour les séries de données sur les superficies en maïs-grain. Avant de présenter les résultats de l'évaluation de ces fermes aux conditions socio-économiques, un portrait des séries de données sur les superficies est présenté pour les municipalités des deux régions agricoles. Ce portrait est toutefois partiel, car il est basé sur les données des producteurs agricoles participant au programme d'assurances de la Financière agricole du Québec. Comme indiqué à la figure 31, pour la période de référence (1985-2005), les valeurs des superficies en maïs-grain pour les municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest varient entre un minimum de 42 ha pour la municipalité de Notre-Dame-de-l'Île-Perrot et un maximum de 1301 ha pour la municipalité de St-Polycarpe (ces deux municipalités se retrouvent dans la MRC de Vaudreuil-Soulanges). La figure 31 indique également qu'il existe plus de valeurs au-dessus du 75e percentile évalué à 717 ha qu'en dessous du 25e percentile dont la valeur est de 219 ha. En moyenne, les superficies en maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest sont estimées à 480 ha et possèdent un écart-type de 328 ha.

Les données de superficies disponibles pour chacune des municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest ont été reclassées autour des valeurs des 25e et 75e percentiles. Les municipalités dont les valeurs de superficie en maïs-grain étaient inférieures au 25e percentile (219 ha) sont classées comme petites, celles avec des valeurs de superficie en maïs-grain comprises entre les 25e et 75e percentiles (entre 219 et 717 ha) sont classées comme

moyennes, tandis que celles dont les valeurs de superficie maïs-grain étaient supérieures au 75e percentile (717 ha) sont classées comme élevées.

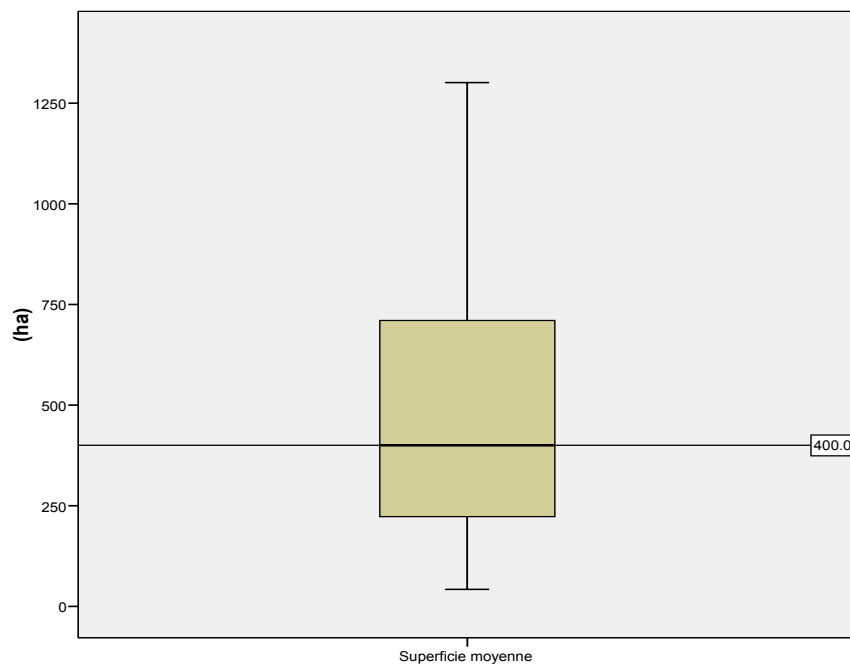


Figure 31. Description des données de superficies moyennes en maïs-grain pour les municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005

La figure 32 présente les résultats de la classification des superficies moyennes en maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest. L'observation de la figure 32 permet de constater que les municipalités avec des superficies moyennes sont relativement plus représentées que celles appartenant aux deux autres classes. Néanmoins, la catégorie des municipalités avec des petites superficies en maïs-grain était plus importante que celle des municipalités avec de grandes superficies en maïs-grain. Pour cette dernière catégorie, bien qu'il existe plusieurs municipalités dans les autres MRC, une certaine concentration peut être constatée dans certaines municipalités de la MRC de Haut-Richelieu.

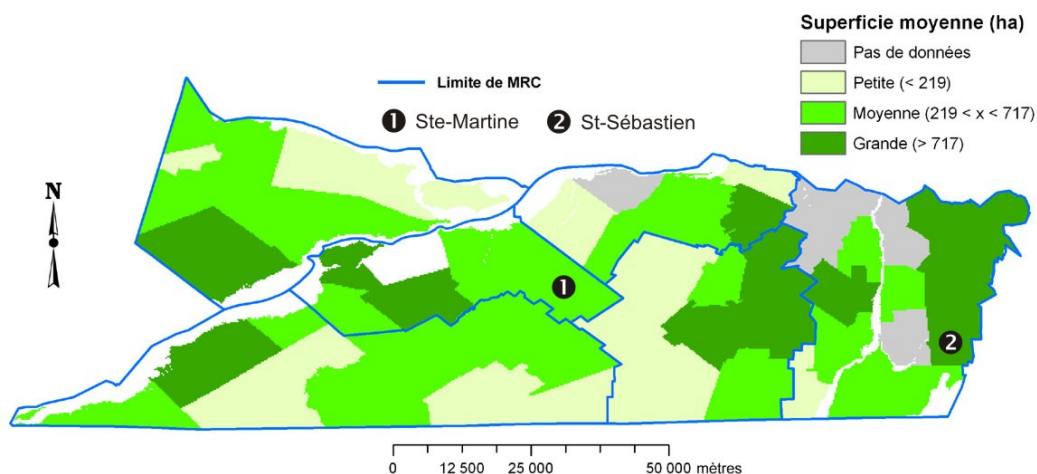


Figure 32. Carte des superficies annuelles moyennes en production de maïs-grain des municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période 1985-2005

À l'échelle des MRC, comme pour les séries de données sur les rendements de maïs-grain, il existe une certaine hétérogénéité au niveau des séries de données sur les superficies en maïs-grain. Le portrait relatif à l'hétérogénéité des données de superficie en maïs-grain est semblable à celui pour les rendements. En effet, comme indiqué à la figure 33, il est possible de constater une distribution assez hétérogène des données autour des 25e et 75e percentiles. Parmi les MRC, celle du Haut-Richelieu affichait la valeur de superficie médiane la plus élevée. Elle est suivie de la MRC de Beauharnois-Salaberry. La plus faible valeur de superficie médiane est enregistrée au niveau de la MRC du Haut-St-Laurent.

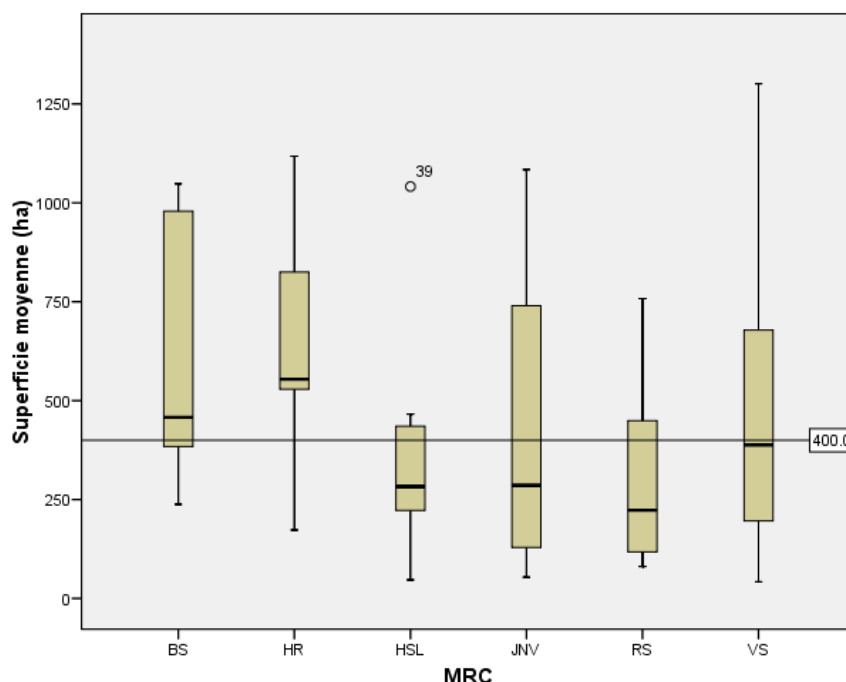


Figure 33. Description des séries de superficies moyennes en maïs-grain à l'échelle des MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005 (BS : Beauharnois-Salaberry; HR : Haut-Richelieu; HSL : Haut-St-Laurent; JNV : Jardins-de-Napierville; RS : Roussillon; VS : Vaudreuil-Soulanges)

La figure 34 présente les valeurs moyennes des superficies en maïs-grain pour chacune des MRC constituant la région agricole de Montérégie-Ouest. En moyenne, les superficies les plus élevées en maïs-grain se trouvaient dans les MRC de Beauharnois-Salaberry et du Haut-Richelieu. Les MRC avec les plus petites valeurs de superficies moyennes étaient celles de Roussillon et du Haut-St-Laurent.

Pour apprécier la signification statistique des différences constatées entre les superficies moyennes des MRC, le test de Mann-Whitney a été effectué. Les résultats de ce test indiqués au tableau 25 permettent de conclure que les différences constatées au niveau des superficies moyennes pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest n'étaient, pour  $\alpha = 0,05$ , statistiquement significatives qu'entre les MRC du Haut-Richelieu et Roussillon d'une part et entre le Haut-St-Laurent et le Haut-Richelieu d'autre part.

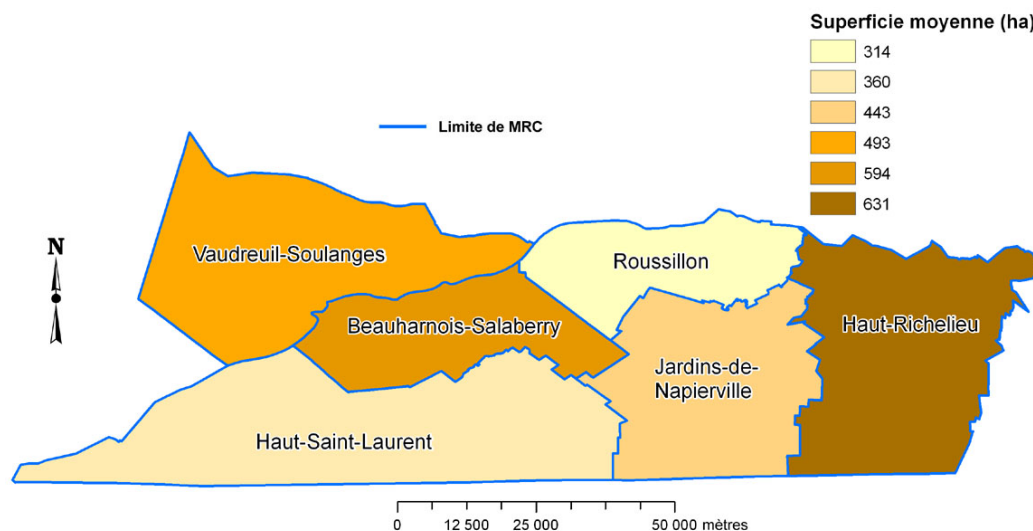


Figure 34. Carte des superficies moyennes en production de maïs-grain par MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005

Tableau 25. Signification statistique des différences de superficies moyennes en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

| Municipalités | Test de Mann-Whitney, $\alpha = 0.05$ |               |       |               |       |       |
|---------------|---------------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|-------|
|               | HR                                    | Rs            | JNV   | HSL           | BS    | VS    |
| <b>HR</b>     |                                       | <b>0,019*</b> | 0,133 | <b>0,012*</b> | 0,539 | 0,284 |
| <b>Rs</b>     |                                       |               | 0,711 | 0,618         | 0,116 | 0,298 |
| <b>JNV</b>    |                                       |               |       | 0,970         | 0,346 | 0,676 |
| <b>HSL</b>    |                                       |               |       |               | 0,108 | 0,533 |
| <b>BS</b>     |                                       |               |       |               |       | 0,482 |

\* Différence significative

Les valeurs de CV pour les superficies en maïs-grain au niveau des municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest sont présentées à la figure 35. Avec une valeur médiane de 0,62, les valeurs de CV des superficies en maïs-grain pour les différentes municipalités de

la région agricole de Montérégie-Ouest varie entre un minimum de 0,33 pour la municipalité de Sainte-Anne-de-Sabrevois et un maximum de 1,61 pour la municipalité de Godmanchester. Les valeurs des 25e et 75e percentiles des CV des superficies en maïs-grain sont évaluées à 0,48 et 0,80, respectivement. En comparant le nombre de valeurs de part et d'autre de ces percentiles, la figure 35 indique l'existence d'un plus grand nombre de municipalités dont les valeurs de CV sont supérieures à celle du 75e percentile.

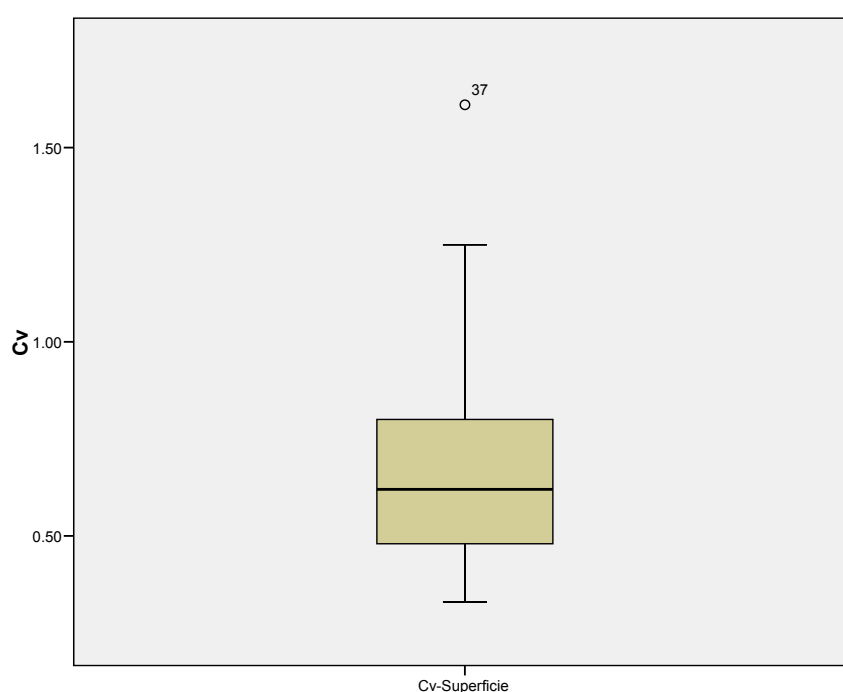


Figure 35. Distribution des CV des superficies moyennes en maïs-grain pour la région agricole de Montérégie-Ouest, 1985-2005

Afin d'effectuer une typologie des niveaux de vulnérabilité aux conditions socio-économiques, on s'est basé sur la distribution des données de CV des séries de superficies en maïs-grain autour des 25e et 75e percentiles. Comme pour la vulnérabilité aux conditions climatiques, trois niveaux de vulnérabilité aux conditions socio-économiques ont été retenus : niveau de vulnérabilité faible (CV des superficies inférieur au 25e percentile évalué à 0,48),

niveau de vulnérabilité moyenne (CV des superficies compris entre les 25e et 75e percentiles, soit entre 0,48 et 0,80) et niveau de vulnérabilité élevée (CV des superficies supérieur au 75e percentile, soit 0,80). Les résultats issus de la reclassification des différentes valeurs de CV sont présentés à la figure 36. L'analyse de cette figure permet de constater que la majorité des municipalités avec une vulnérabilité élevée aux conditions socio-économiques sont situées au sud de la région agricole de Montérégie-Ouest et plus précisément au niveau des MRC du Haut-St-Laurent et des Jardins-de-Napierville. La MRC de Vaudreuil-Soulanges était la seule MRC qui ne possédait aucune municipalité avec une vulnérabilité élevée aux conditions socio-économiques. L'appartenance des différentes municipalités aux trois niveaux de vulnérabilité aux facteurs socio-économiques est indiquée au tableau 26. Sur un total de 56 municipalités pour lesquelles on disposait d'une série de données sur les superficies en maïs-grain, la moitié d'entre elles (28) fait partie de la classe de vulnérabilité moyenne. Le nombre de municipalités appartenant à la classe de vulnérabilités faible et forte était de 13 et 15, respectivement.

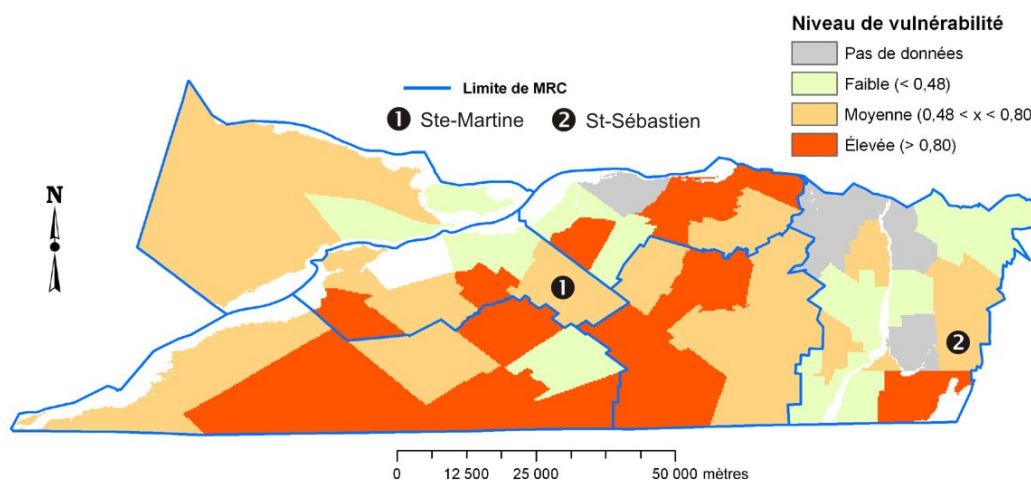


Figure 36. Carte de niveaux de vulnérabilité de la région agricole de Montérégie-Ouest aux conditions socio-économiques pour la période 1985-2005

Il est important de signaler que les deux municipalités (Sainte-Martine avec un CV pour les superficies en maïs-grain de 0,74 et Saint-Sébastien avec un CV pour les superficies



en maïs-grain de 0,62) de la région agricole de Montérégie-Ouest retenues pour d'autres analyses au cours de la période future sont classées parmi celles avec un niveau de vulnérabilité moyenne aux conditions socio-économiques. Bien qu'elles appartiennent à la même classe de vulnérabilité aux conditions socio-économiques, la municipalité de Sainte-Martine possède une valeur de CV pour les superficies en maïs-grain plus élevée que celle de la municipalité de Saint-Sébastien. Ces deux municipalités sont plus vulnérables aux conditions socio-économiques qu'aux conditions climatiques.

Tableau 26. Distribution des municipalités de Montérégie-Ouest selon les niveaux de vulnérabilité aux conditions socio-économiques au cours de la période de référence, 1985-2005

| Niveaux de vulnérabilité aux conditions socio - économiques | Nom des municipalités  | Nombre de municipalités |
|---|--|-------------------------|
| Faible  | Noyan, Notre-Dame-du-Mont-Carmel, St-Chrysostome, St-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Ste-Anne-de-Sabrevois, St-Blaise-sur-Richelieu, Beauharnois, St-Isidore, Les Cèdres, Ste-Brigitte-d'Iberville, Mont-St-Grégoire, Chateauguay, Notre-Dame-de-l'île-Perrot  | 13                      |
| Moyen   | Dundee, St-Bernard-de-Lacolle, Henryville, St-Anicet, Ormstown, Ste-Barbe, St-Valentin, Saint-Sébastien, St-Patrice-de-Sherrington, St-Louis-de-Gonzague<br>St-Cyprien-de-Napierville, St-Alexandre, Salaberry-de-Valleyfield, Sainte-Martine, St-Rémi, St-Jacques-le-Mineur, St-Télésphore, St-Jean-sur-Richelieu, St-Mathieu, Coteau-du-Lac, St-Polycarpe, St-Clet, St-Philippe, Ste-Justine-de-Newton, Ste-Marthe, Très-St-Rédempteur, Vaudreuil-Dorion, Rigaud | 28                      |
| Élevé   | Elgin, Havelock, St-Georges-de-Clarenceville, Hinchinbrooke, Hemmingford, Godmanchester, Ste-Clotilde-de-Chateauguay, Très-St-Sacrement, St-Stanislas-de-Kostka, St-Étienne-de-Beauharnois, St-Michel, St-Édouard, Mercier, St-Constant, La Prairie  | 15                      |

La figure 37 synthétise les informations relatives à la distribution des CV pour les superficies en maïs-grain à l'échelle des MRC. Des valeurs extrêmes et déviantes de CV sont

constatées pour les MRC du Haut-Richelieu et du Haut-St-Laurent. La MRC du Haut-Richelieu possède le CV médian le plus faible.

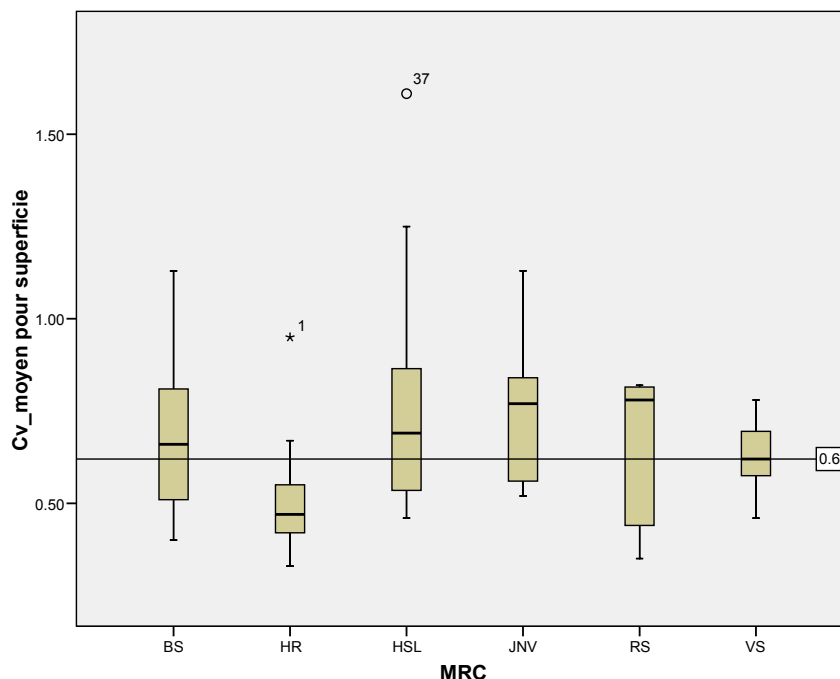


Figure 37. Distribution des CV moyens de superficies en maïs-grain par MRC de la région de Montérégie-Ouest pour la période 1985-2005 (BS : Beauharnois-Salaberry; HR : Haut-Richelieu; HSL : Haut-St-Laurent; JNV : Jardins-de-Napierville; RS : Roussillon; VS : Vaudreuil-Soulanges)

Les valeurs moyennes des CV par MRC pour les superficies en maïs-grain sont présentées à la figure 38. La MRC du Haut-St-Laurent possède le CV moyen le plus élevé pour les superficies en maïs-grain, tandis que celle du Haut-Richelieu possède la plus faible valeur de CV moyen pour les superficies en maïs-grain. En croisant les données moyennes de superficies en maïs-grain et de CV pour les superficies en maïs-grain par MRC (Tableau 27), les deux points suivants méritent d'être signalés :

- la MRC du Haut-Richelieu affiche la plus forte valeur de superficie moyenne en maïs-grain, mais la plus faible valeur au niveau des CV,

- la MRC Roussillon, bien qu'elle ait été classée dernière en termes de superficies moyennes en maïs-grain, ne possède pas pour autant la plus forte valeur de CV moyen pour les superficies en maïs-grain.

Sur la base de ce constat, il semble qu'il n'existe aucun lien direct entre les superficies moyennes en maïs-grain et le CV de celles-ci.

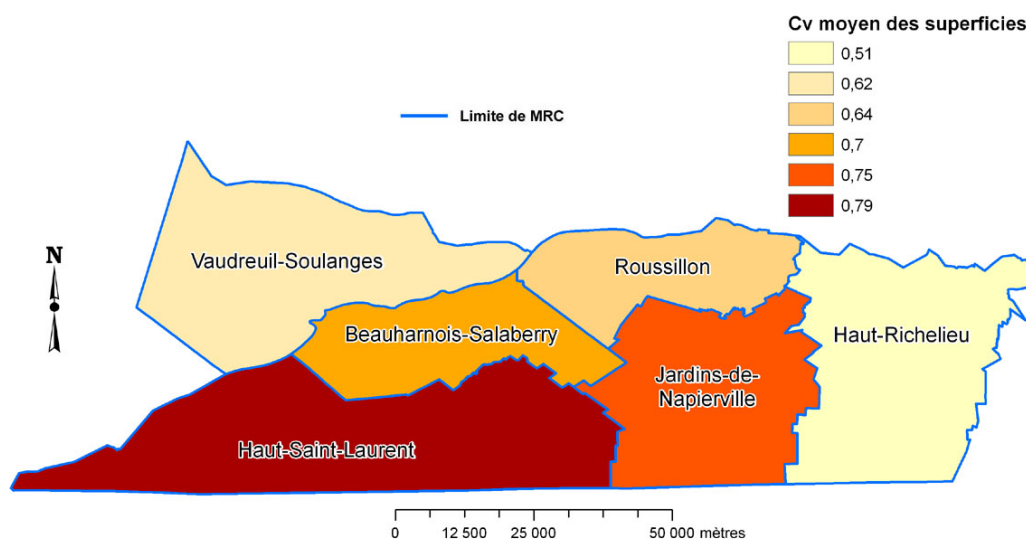


Figure 38. Carte de CV moyens des superficies en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest, 1985-2005

Tableau 27. Comparaison des superficies moyennes et de CV moyens des superficies en maïs-grain entre les MRC de la région de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

| <b>Nom des MRC</b>     | <b>Superficie moyenne<br/>(ha)</b> | <b>CV moyen</b> |
|------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Haut-Richelieu         | 631                                | 0,51            |
| Roussillon             | 314                                | 0,64            |
| Jardins-de-Napierville | 443                                | 0,75            |
| Haut-St-Laurent        | 360                                | 0,79            |
| Beauharnois-Salaberry  | 594                                | 0,70            |
| Vaudreuil-Soulanges    | 493                                | 0,62            |

Le test non paramétrique de Mann-Whitney a été également effectué pour les valeurs moyennes de CV pour les superficies en maïs-grain afin d'apprécier la signification statistique des différences observées au niveau de ces valeurs. Les résultats de ce test sont présentés au tableau 28. Celui-ci indique qu'il existe, pour  $\alpha = 0,05$ , une différence statistiquement significative entre les MRC suivantes :

- Haut-Richelieu et Jardins-de-Napierville,
- Haut-Richelieu et Haut-St-Laurent, et
- Haut-Richelieu et Vaudreuil-Soulanges.

Tableau 28. Signification statistique des différences de moyennes de CV de superficies en maïs-grain pour les MRC de la région agricole de Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

| Municipalités                 | Test de Mann-Whitney, $\alpha = 0,05$ |            |                        |                 |                       |                     |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------|------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
|                               | Haut-Richelieu                        | Roussillon | Jardins-de-Napierville | Haut-St-Laurent | Beauharnois-Salaberry | Vaudreuil-Soulanges |
| <b>Haut-Richelieu</b>         |                                       | 0,284      | <b>0,005*</b>          | <b>0,013*</b>   | 0,139                 | <b>0,020*</b>       |
| <b>Roussillon</b>             |                                       |            | 0,368                  | 0,555           | 0,744                 | 0,525               |
| <b>Jardins-de-Napierville</b> |                                       |            |                        | 0,790           | 0,593                 | 0,160               |
| <b>Haut-St-Laurent</b>        |                                       |            |                        |                 | 0,777                 | 0,449               |
| <b>Beauharnois-Salaberry</b>  |                                       |            |                        |                 |                       | 0,571               |

\* Différence significative

Comme pour les rendements, au niveau de la région du Lac-St-Jean-Est, les données de superficie en maïs-grain n'étaient disponibles que pour les municipalités de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et d'Hébertville. Entre 2000 et 2005, la valeur moyenne des superficies en maïs-grain pour les deux municipalités de la région agricole de Lac-St-Jean-Est est de 118 ha. Les valeurs minimale et maximale des superficies en maïs-grain pour cette région sont de 111 ha et 124 ha pour les municipalités de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et d'Hébertville, respectivement. Avec une valeur de 1 résultant du test de Mann-Whitney pour  $\alpha = 0,05$ , il n'existe pas de différence significative entre les superficies moyennes en maïs-grain pour ces deux municipalités. Toutefois, une série plus longue de données pour ces deux municipalités permettrait de mieux apprécier la signification statistique des différences constatées au niveau

de l'évolution des superficies en maïs-grain. Les superficies moyennes en maïs-grain au niveau des municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest sont généralement plus élevées que celles de Lac-St-Jean-Est. Au niveau des CV des superficies en maïs-grain, la valeur moyenne pour la région de Lac-St-Jean-Est est de 0,48, avec un minimum de 0,37 pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan et d'un maximum de 0,59 pour celle d'Hébertville. Contrairement à la région agricole de Montérégie-Ouest, il est impossible d'utiliser les valeurs des percentiles de CV pour réaliser une typologie des niveaux de vulnérabilité des municipalités de la MRC de Lac-St-Jean-Est. Pour celles-ci, la typologie est plutôt basée sur le CV moyen pour la région. Ainsi, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan avec un CV moyen pour les superficies en maïs-grain de 0,37 est considérée comme ayant une vulnérabilité faible aux conditions socio-économiques, tandis que la municipalité d'Hébertville dont le CV moyen pour les superficies en maïs-grain est de 0,59 se retrouve au niveau de la classe de vulnérabilité élevée. Avec un CV moyen pour les superficies en maïs-grain de 0,48, les fermes productrices de maïs-grain de Lac-St-Jean-Est possèdent une vulnérabilité plus faible aux conditions socio-économiques que celles de la région agricole de Montérégie-Ouest dont le CV moyen pour les superficies en maïs-grain est de 0,66.

Les municipalités possédant à la fois une vulnérabilité élevée aux conditions climatiques et aux conditions socio-économiques sont considérées comme ayant un niveau de vulnérabilité multiple. En effet, au niveau de la région agricole de Montérégie-Ouest, six municipalités se retrouvent en situation de vulnérabilité multiple. Il s'agit des municipalités d'Elgin, d'Havelock, de Hinchinbrooke, d'Hemmingford, de St-Stanislas-de-Kostka et de La Prairie. Parmi ces six municipalités avec une vulnérabilité multiple, trois d'entre elles font partie de la MRC du Haut-St-Laurent. Pour la région agricole du Lac-St-Jean-Est, aucune municipalité ne présente une vulnérabilité multiple. En effet, la municipalité de Lac-à-la-

Croix/Métabetchouan avait une vulnérabilité élevée aux conditions climatiques tandis que la vulnérabilité élevée aux conditions socio-économiques était enregistrée au niveau de la municipalité d'Hébertville.

En termes de synthèse sur les niveaux de vulnérabilité aux conditions socio-économiques pour la période de référence et sur la base des mesures de la composante de vulnérabilité (Polsky et al., 2007) ou du paramètre révélateur de l'état du système (superficie en maïs-grain), plusieurs points importants méritent d'être signalés à différentes échelles spatiales. À l'échelle des régions agricoles :

- Le Lac-St-Jean-Est est moins vulnérable que la Montérégie-Ouest.

Entre les deux municipalités de la Montérégie-Ouest retenues pour les analyses futures :

- La municipalité de Sainte-Martine est plus vulnérable que celle de Saint-Sébastien.

Entre les municipalités du Lac-St-Jean-Est :

- La municipalité d'Hébertville est plus vulnérable que celle de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan.

### **7.3 Explication des variabilités au niveau des rendements et des superficies en maïs-grain pour les trois municipalités retenues**

Si la variabilité des rendements du maïs-grain peut être expliquée principalement par les paramètres biophysiques, notamment les conditions climatiques et pédologiques, celle des superficies en maïs-grain est influencée par un ensemble de facteurs dont les relations et les liens ne sont pas toujours bien connus (Lambin et al., 2000). Pour expliquer la variabilité des rendements à l'échelle des municipalités de Sainte-Martine, Saint-Sébastien et Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les UTM pour les années dont les données de rendement étaient disponibles (voir chapitre 6) ont été considérées. À l'aide d'une analyse de régression, le pouvoir explicatif des UTM sur la variabilité des rendements du maïs-grain a pu être apprécié.

Par contre, l'explication de la variabilité des superficies en maïs-grain au niveau de ces trois municipalités est essentiellement basée sur des facteurs qualitatifs identifiés à la suite des rencontres avec les producteurs agricoles.

Les résultats des analyses de régression entre les UTM et les rendements du maïs-grain pour les trois municipalités sont présentés au tableau 29. Celui-ci, à l'aide des valeurs du coefficient de corrélation de Pearson, indique le type et le degré de relation existant entre les deux variables. Pour les trois municipalités, il existe une relation positive entre les deux variables (Figures 39, 40 et 41). Les résultats des analyses de régression sont similaires à ceux obtenus dans d'autres études effectuées au Canada, notamment au Québec (Bootsma et al., 2005; Bootsma et al., 2001). Comparativement à la municipalité de Saint-Sébastien, le degré de relation est plus fort pour les municipalités de Sainte-Martine et de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Si le degré de relation entre les UTM et les rendements est relativement faible pour la municipalité de Saint-Sébastien, il n'est toutefois pas statistiquement significatif pour  $\alpha = 0,01$ . Le degré de relation relativement faible entre les UTM et les rendements pour la municipalité de Saint-Sébastien peut s'expliquer par l'utilisation de données climatiques provenant d'une station climatique située dans une municipalité limitrophe (Phillipsburg) et également par la présence du lac Champlain. Pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, la valeur du coefficient indique qu'une bonne partie des variabilités des rendements du maïs-grain peut s'expliquer par la variation des UTM. Toutefois, pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien, le pouvoir explicatif des UTM par rapport aux rendements était moins marqué. Une meilleure explication des niveaux de variabilité des rendements doit intégrer d'autres paramètres biophysiques et de pratiques culturales (Bootsma et al., 2005).



Tableau 29. Degré de relation entre les UTM et les rendements de maïs-grain des municipalités de Sainte-Martine, Saint-Sébastien et Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, 1985-2005

| <b>Municipalités</b>         | <b>Coefficient de corrélation<br/>de Pearson</b> | <b>Niveau de significativité<br/>statistique</b> |
|------------------------------|--|--|
| Sainte-Martine               | 0,55   | <b>0,01**</b>                                    |
| Saint-Sébastien              | 0,21   | 0,33   |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 0,90   | <b>0,01*</b>                                     |

\*\* Statistiquement significatif pour  $p = 0,01$

\* Statistiquement significatif pour  $p = 0,05$

Si les relations entre les facteurs qui déterminent le niveau de rendement du maïs-grain sont relativement bien comprises, ce n'est toutefois pas le cas pour ceux qui influencent l'allocation des cultures sur les superficies des fermes agricoles, notamment celles qui s'adonnent à la culture du maïs-grain. En effet, contrairement aux facteurs qui déterminent le niveau de rendement, les facteurs conditionnant l'allocation des cultures sur une ferme sont beaucoup plus spécifiques et les relations existant entre eux sont relativement plus complexes et par conséquent plus difficiles à cerner. Pour tenter d'apporter des éléments d'explication sur les variabilités constatées au niveau des superficies en maïs-grain, on a cherché à identifier tout d'abord les facteurs susceptibles d'influencer le processus de prise de décisions relatif à l'allocation des cultures. Une fois ces facteurs identifiés, une analyse de fréquence a été effectuée en vue de préciser les principaux facteurs considérés lors du processus d'allocation des cultures sur une ferme agricole.

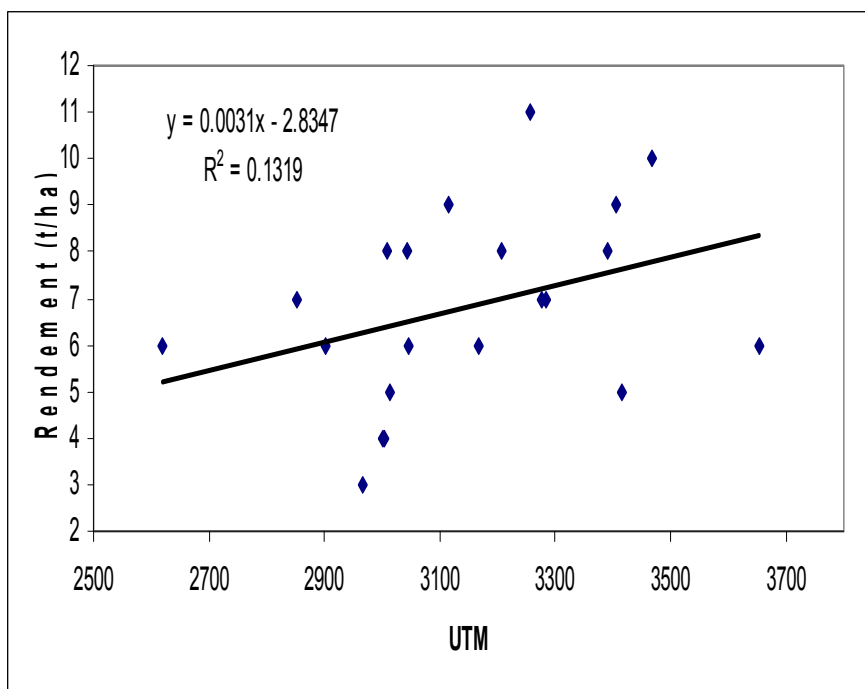


Figure 39. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Sainte-Martine au cours de la période 1985-2005

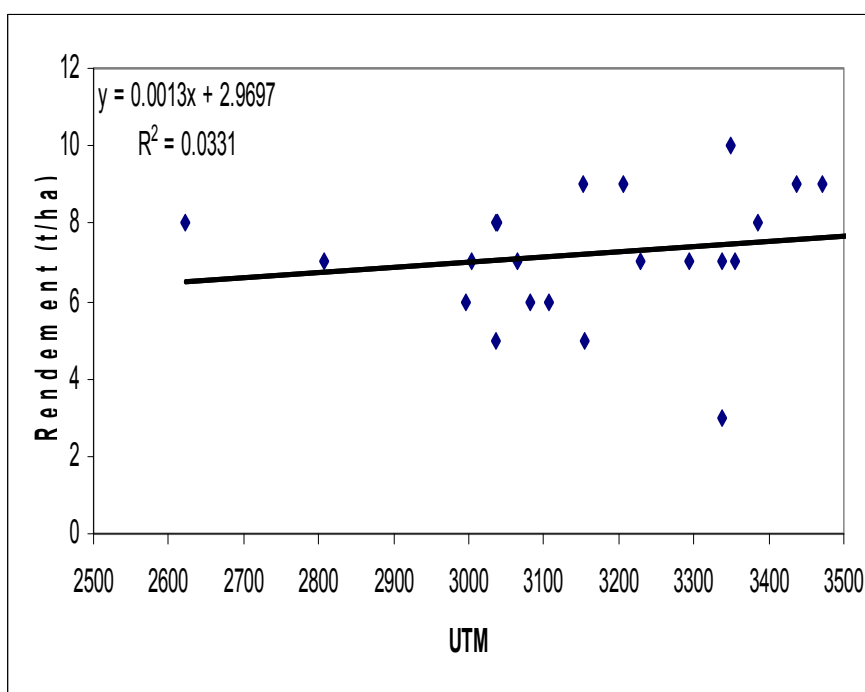


Figure 40. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Saint-Sébastien au cours des deux périodes 1982-2003 et 1985 à 2005

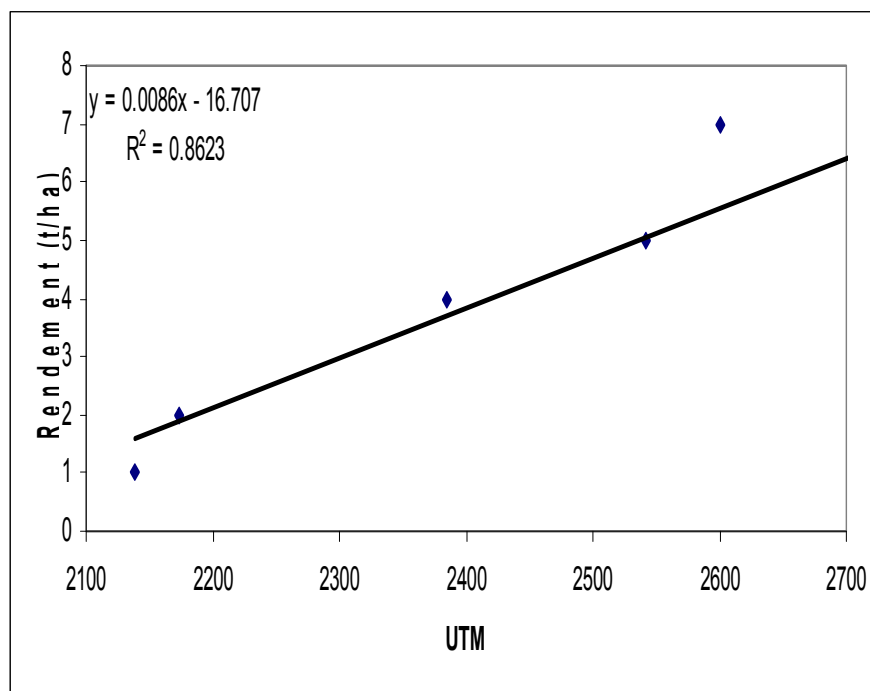


Figure 41. Relation entre les UTM moyens et les rendements moyens du maïs-grain pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au cours de la période 2000 à 2005

Les facteurs mentionnés par les producteurs agricoles des trois municipalités au niveau des deux régions agricoles peuvent être regroupés en deux grandes catégories : facteurs biophysiques et facteurs socio-économiques. En matière de facteurs biophysiques, les types de sol, les plans de rotation des cultures et les conditions climatiques étaient généralement cités comme les facteurs considérés lors du processus d'allocation des cultures sur la ferme. Pour les facteurs socio-économiques, un plus grand nombre de critères ont été considérés. Il s'agit des conditions du marché (le prix des intrants, la capacité d'écouler la production, les bénéfices potentiels, le niveau et la qualité de production aux États-Unis), des besoins du cheptel et la distance des parcelles par rapport à l'étable (pour les producteurs faisant également de l'élevage), la capacité d'entreposage, l'accès à la main-d'œuvre et à la machinerie pour la réalisation des travaux agricoles et la disponibilité d'informations sur la culture à pratiquer. Ces facteurs, regroupés en éléments biophysiques et socio-économiques, n'ont pas été également mentionnés par les agriculteurs des trois municipalités. Le tableau 30

présente la fréquence de chaque facteur, autrement dit le nombre de fois qu'ils ont été mentionnés, par les producteurs, comme critères de prises de décisions dans l'allocation des cultures sur les fermes. La fréquence maximale d'un facteur est 15, correspondant au nombre de producteurs enquêtés dans chacune des trois municipalités. Comme on peut le constater au niveau du tableau 30, les facteurs les plus cités étaient le plan de rotation des cultures et les conditions de marché.

Tableau 30. Facteurs considérés dans le processus de décisions relatives à l'allocation des cultures sur les fermes agricoles des municipalités à l'étude en Montérégie-Ouest et au Lac-St-Jean-Est

| Facteurs mentionnés                                     | Municipalités  |                 |                              |
|---|----------------|-----------------|------------------------------|
|   | Sainte-Martine | Saint-Sébastien | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |
| Plan de rotation des cultures                           | 15             | 14              | 14                           |
| Conditions de marché                                    | 14             | 10              | 11                           |
| Types de sols   | 2              | 5               | 12                           |
| Conditions météorologiques                              | 1              | 2               | 1                            |
| Besoins du cheptel                                      | 3              | 3               | 1                            |
| Distance des parcelles par rapport à l'étable           | 2              | 2               | 5                            |
| Capacité d'entreposage                                  | 2              | 2               | 0                            |
| Accès à la main-d'œuvre et à la machinerie              | 3              | 0               | 0                            |
| Disponibilité d'informations sur la culture à pratiquer | 0              | 2               | 1                            |

Bien que le facteur « type de sols » ait été mentionné séparément, le facteur « plan de rotation des cultures » tient implicitement compte de certains aspects biophysiques comme les conditions pédologiques et climatiques. Les facteurs les moins cités étaient l'accès à la main d'œuvre et à la machinerie ainsi que la disponibilité d'informations sur la culture à pratiquer.

En utilisant les UTM, il était possible d'expliquer partiellement la variabilité des rendements du maïs-grain pour les trois municipalités réparties dans les deux régions agricoles. Pour la variabilité des superficies en maïs-grain, les facteurs déterminants dans le processus de prise de décisions d'allocations des cultures ont été identifiés et leur fréquence a été présentée. Contrairement aux UTM pour les rendements, il était impossible, d'après les données dont on disposait, de se prononcer sur le degré d'influence de chacun des facteurs sur le choix des cultures à pratiquer sur les superficies des fermes. Néanmoins, au niveau des trois municipalités, les deux principaux facteurs les plus considérés dans le processus de prise de décisions sur l'allocation des cultures étaient le plan de rotation des cultures et les conditions de marché.

#### **7.4 Capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain pour la période de référence**

Au cours de la période de référence (1985-2005), les niveaux de vulnérabilité estimée à l'aide des CV de rendements et de superficies en maïs-grain intégraient implicitement la capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain des régions à l'étude. Cette section présente tout d'abord les principaux déterminants de capacité adaptative pour les deux régions agricoles et ensuite un indicateur de capacité adaptative pour chacune des trois municipalités devant faire l'objet d'analyses au cours de la période future 2010-2039. Les principaux déterminants de capacité adaptative identifiés lors de groupes de discussions au niveau des

trois municipalités ont été classés par ordre d'importance selon le PAH tel qu'indiqué dans le chapitre sur la méthodologie.

Les facteurs susceptibles d'influencer la capacité adaptative des agriculteurs aux changements climatiques et conditions socio-économiques au cours de la période de référence variaient selon la région agricole. En Montérégie-Ouest, seulement sept facteurs ou critères ont été identifiés contre onze au Lac-Saint-Jean-Est. Les facteurs identifiés par les agriculteurs en Montérégie-Ouest étaient les suivants :

- 1) Ressources financières (capital économique; ces ressources financières réfèrent au capital financier réellement possédé ou que l'agriculteur peut mobiliser)
- 2) Conditions de marché (prix des intrants, taux de change, prix des produits agricoles, entre autres)
- 3) Relève agricole familiale
- 4) Relève institutionnelle (celle-ci correspond à la relève au niveau d'institutions évoluant dans le secteur agricole, notamment le MAPAQ, La Financière agricole du Québec, les clubs-conseils, Agriculture et Agroalimentaire Canada)
- 5) Politiques et programmes (adéquation, durée, incitatifs financiers)
- 6) Conditions climatiques (extrêmes et niveau de variabilité)
- 7) Pression foncière

Pour les agriculteurs du Lac-Saint-Jean-Est, représentés par ceux de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les facteurs ou critères qui influencent leur capacité d'adaptation aux changements climatiques et conditions socio-économiques étaient représentés par les onze éléments suivants :

- 1) Ressources financières
- 2) Niveau de formation (notamment le niveau de formation du chef de l'exploitation agricole et des autres membres de la famille vivant au sein de l'exploitation agricole)

- 3) Conditions de marché
- 4) Support des clubs-conseils
- 5) Relève agricole familiale
- 6) Relève institutionnelle
- 7) Politiques et programmes
- 8) Qualité de la recherche agricole (cultivars ou pratiques culturales spécifiques à la zone, résultats de recherche vulgarisés au moment opportun)
- 9) Conditions climatiques
- 10) Diminution de la place occupée par la production animale
- 11) Perception du phénomène des changements climatiques

Ces deux listes révèlent une certaine différence non seulement en termes de nombre de facteurs considérés comme étant des déterminants de la capacité adaptative, mais aussi en termes de types de déterminants. Ce constat indique, à certains égards, des contextes de production un peu différents dans les deux régions agricoles. À titre d'exemple, contrairement aux agriculteurs du Lac-Saint-Jean-Est, ceux de la Montérégie-Ouest semblaient être moins préoccupés par les aspects relatifs à la recherche agricole. Pour les agriculteurs de Lac-St-Jean-Est, le fait qu'il y ait généralement un retard relatif dans la diffusion de résultats de recherche spécifique à leurs conditions de production représentait une forme de barrière à leur volonté de s'adapter aux nouvelles conditions biophysiques et socio-économiques de production. Par contre, certains agriculteurs en Montérégie-Ouest ont mentionné l'influence de la pression foncière sur leur capacité adaptative, tandis qu'au Lac-Saint-Jean-Est, ce problème ne se posait presque pas. Comme le nombre de facteurs ou de critères déterminant la capacité adaptative étaient différents d'une région à l'autre, pour avoir une base de comparaison commune, les cinq premiers critères, considérés comme les principaux

déterminants de la capacité adaptative des agriculteurs des deux régions agricoles aux changements climatiques ont été retenus à des fins d'analyses.

La présentation des résultats par ordre de priorité ou d'importance pour les cinq déterminants de capacité adaptative est effectuée à l'aide de figures. Au niveau de celles-ci, l'axe des abscisses est constitué des principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain, tandis que l'axe des ordonnées représente les valeurs de pondération accordées (sans dimension, avec une valeur maximale de 1).

Pour la Montérégie-Ouest, comme indiqué à la figure 42 les cinq plus importants déterminants de capacité adaptative étaient représentés par les critères suivants : Conditions de marché, Politiques et programmes, Conditions climatiques, Ressources financières, et Relève agricole familiale. Les conditions de marché ainsi que les politiques et programmes occupaient la première place parmi les déterminants de capacité adaptative des agriculteurs de la Montérégie-Ouest. Les critères relatifs à la relève institutionnelle et à la pression foncière avaient la plus faible influence sur les potentialités d'adaptation des agriculteurs de la région. Il est important de souligner que bien que les agriculteurs aient perçu les conditions climatiques comme étant un facteur important dans leur capacité adaptative, elles étaient néanmoins moins prioritaires que les conditions de marché. Toutefois, les ressources financières des fermes ayant un certain lien avec les conditions de marché étaient plutôt placées après les conditions climatiques. En termes pratiques, en tenant toujours compte des conditions climatiques, les agriculteurs regardent davantage les conditions de marché avant de prendre une décision d'adaptation. Autrement dit, même si les conditions climatiques propices à une culture ou à un ajustement au niveau de la ferme sont réunies, le facteur déterminant dans l'adoption d'une culture ou d'un ajustement semble être les conditions de marché, notamment la marge de bénéfices qui en résulterait. Ceci traduit bien le fait que l'agriculteur se considère avant tout comme un agent économique. La valeur moyenne du



ratio de cohérence (un indicateur renseignant sur le niveau de cohérence des jugements) pour les agriculteurs de la Montérégie-Ouest était estimée à 0,29 avec des valeurs variant entre 0,04 et 0,91. Cette valeur moyenne est supérieure au seuil d'acceptabilité de 0,10 recommandé par le PAH. Toutefois, compte tenu des limites de temps et de disponibilité des producteurs agricoles, il était impossible de reprendre le processus afin d'avoir un ratio de cohérence qui respecte le seuil recommandé par le PAH. Cela indique que les producteurs agricoles de la Montérégie-Ouest n'ont pas toujours été cohérents dans leur jugement relatif à l'ordre de priorité ou d'importance des principaux déterminants de capacité adaptative.

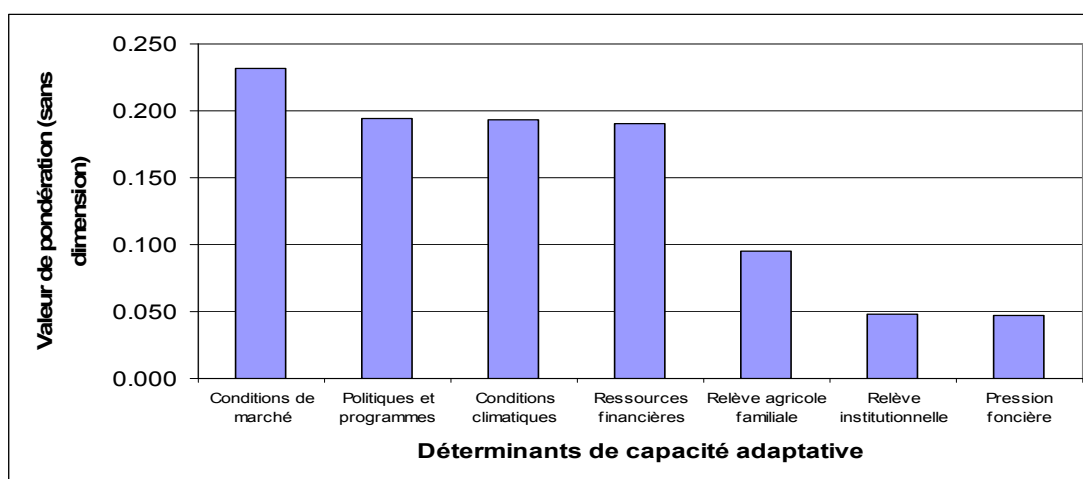


Figure 42. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération en Montérégie-Ouest au cours de la période de référence, 1985-2005

Pour le Lac-Saint-Jean-Est et plus précisément dans la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les cinq premiers déterminants de capacité adaptative étaient selon un ordre de priorité décroissant : Conditions climatiques, Relève agricole familiale, Qualité de la recherche agricole, Niveau de formation et Politiques et programmes (Figure 43). Contrairement à la Montérégie-Ouest, la relève agricole était, considérée, après les conditions climatiques, comme le principal déterminant de capacité adaptative au Lac-Saint-Jean-Est. La qualité de la recherche occupait également une place importante, soit la 4e, parmi les

principaux déterminants de capacité adaptative. Ces résultats indiquent la priorité que les agriculteurs du Lac-Saint-Jean-Est accordent aux éléments du capital social et humain dans le processus d'adaptation, contrairement à ceux de la Montérégie-Ouest où les éléments du capital économique semblaient être les principaux déterminants de capacité adaptative. Soulignons que les politiques et programmes figuraient également parmi les cinq premiers déterminants de capacité adaptative des agriculteurs du Lac-Saint-Jean-Est. En effet, l'existence de politiques et de programmes appropriés semble être des éléments importants dans le processus d'adaptation des agriculteurs aux conditions climatiques et aux sources de pression d'ordre économiques. La valeur moyenne du ratio de cohérence pour les agriculteurs de Lac-Saint-Jean-Est était évaluée 0,46 avec des valeurs variant entre 0,08 et 1,16.

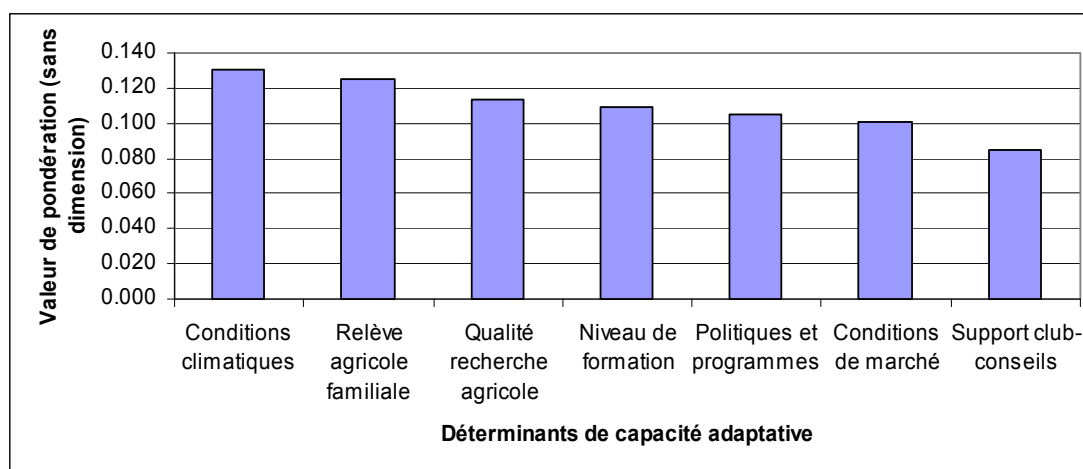


Figure 43. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération au Lac-St-Jean-Est au cours de la période de référence, 1985-2005

Entre les deux municipalités de la Montérégie-Ouest (Sainte-Martine et Saint-Sébastien), aucune différence en termes de types de déterminants n'a été constatée au niveau des cinq premiers déterminants de capacité adaptative, autrement dit les cinq premiers déterminants de capacité adaptative étaient similaires pour ces deux municipalités. Toutefois, l'ordre de priorité ou d'importance accordé à ces cinq premiers déterminants était un peu

différent (Figures 44 et 45). Pour Sainte-Martine, l'ordre de priorité ou d'importance des déterminants de capacité adaptative était le suivant : Conditions de marché, Ressources financières, Politiques et programmes, Conditions climatiques et Relève agricole familiale. À l'échelle de la municipalité de Sainte-Martine, les déterminants relatifs aux conditions de marché et aux ressources financières étaient les plus importants. Pour Saint-Sébastien, l'ordre de priorité ou d'importance des déterminants de capacité adaptative était le suivant : Conditions climatiques, Politiques et programmes, Conditions de marché, Ressources financières et Relève agricole familiale. En effet, pour la municipalité de Saint-Sébastien, la priorité était surtout accordée aux conditions climatiques suivies des politiques et programmes. Les valeurs moyennes du ratio de cohérence pour les agriculteurs de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien étaient respectivement de 0,21 et 0,37. Pour les agriculteurs de Sainte-Martine, les valeurs du ratio de cohérence variaient entre 0,04 et 0,49. À l'échelle de la municipalité de Saint-Sébastien, les valeurs du Ratio de Cohérence se trouvaient entre 0,16 et 0,91.

De façon générale, les valeurs moyennes de ratio de cohérence dépassent le seuil admissible de 0,10. De façon absolue, ces valeurs signifient que les producteurs agricoles n'étaient pas toujours cohérents dans leurs jugements. Toutefois, cette situation, loin d'être un manque absolu de cohérence, peut être due au fait que les producteurs agricoles n'arrivaient pas à se rappeler, lors des enquêtes, des poids ou priorités accordés à certains critères au cours du processus d'analyse multicritère. Une conclusion définitive de la portée de ces valeurs de ratio de cohérence nécessiterait des conditions d'enquête qui permettraient aux producteurs agricoles de revoir les poids ou priorités attribués à certains critères tout au long du processus.

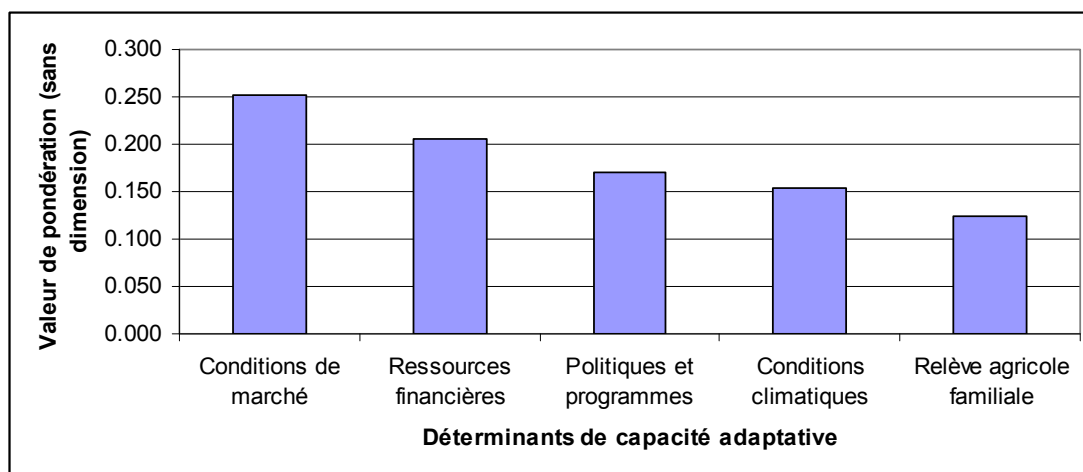


Figure 44. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine au cours de la période de référence, 1985-2005

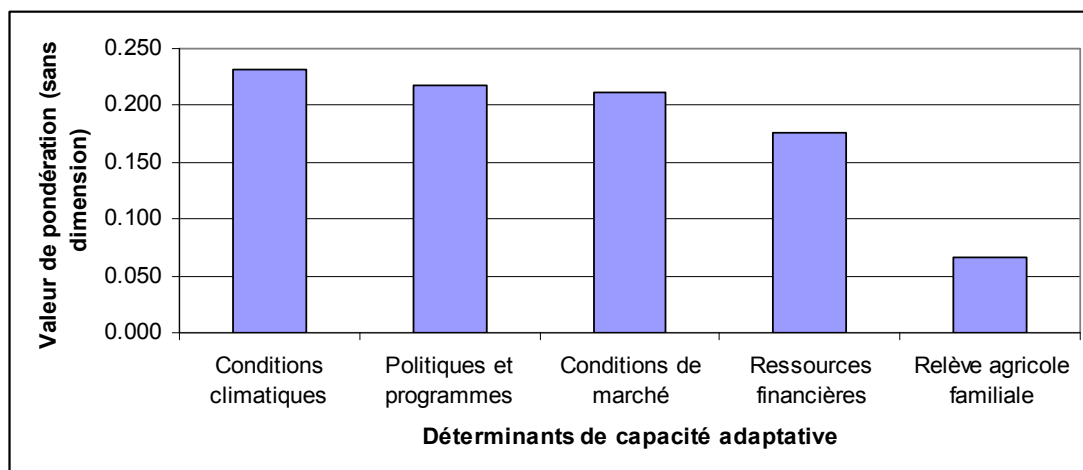


Figure 45. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien au cours de la période de référence, 1985-2005

Pour la municipalité de Sainte-Martine, l'âge moyen des agriculteurs enquêtés était de 48 ans. Entre les agriculteurs dont l'âge était supérieur ou égal à 48 ans et ceux ayant 47 ans ou moins, aucune différence n'a été observée au niveau du type des cinq premiers déterminants de capacité adaptative. Si les deux déterminants les plus importants (conditions de marché et ressources financières) étaient les mêmes pour les deux groupes d'âge, ils n'accordaient pas toutefois le même ordre de priorité pour les trois autres parmi les cinq

premiers déterminants (Figures 46 et 47). Les valeurs moyennes du ratio de cohérence étaient à peu près égales pour les deux groupes d'âge : 0,21 pour les agriculteurs de 48 ans et plus et 0,22 pour ceux ayant 47 ans ou moins.

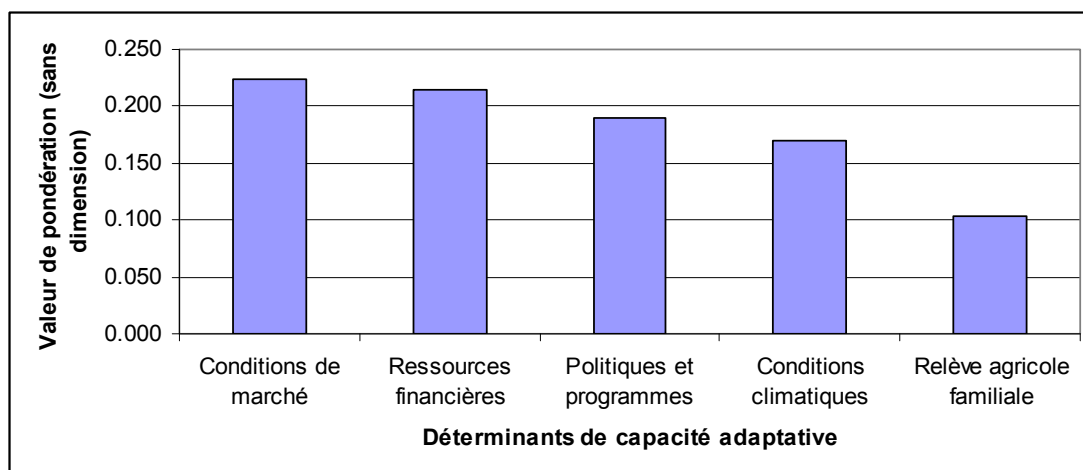


Figure 46. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine pour les agriculteurs de 48 ans et plus au cours de la période de référence, 1985-2005

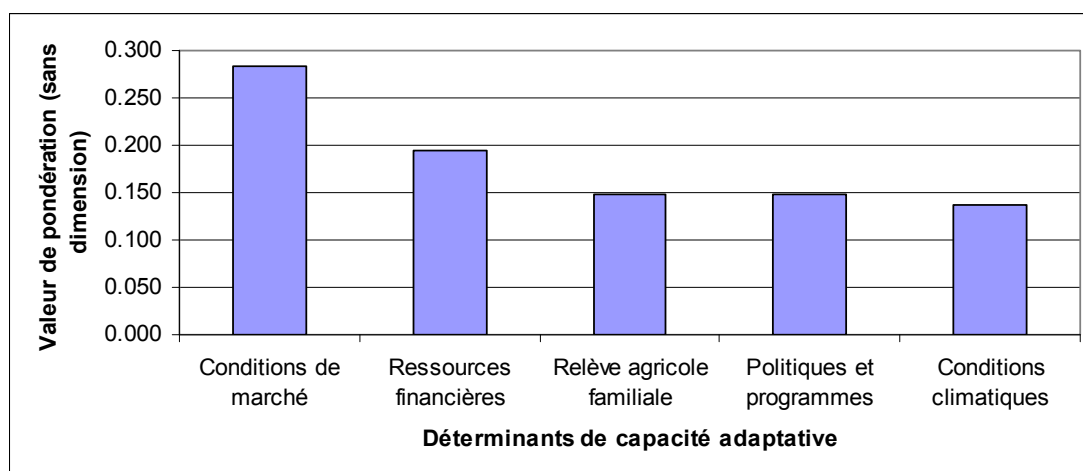


Figure 47. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Sainte-Martine pour les agriculteurs de 47 ans ou moins au cours de la période de référence, 1985-2005

Pour la municipalité de Saint-Sébastien, l'âge moyen des agriculteurs enquêtés était de 47 ans. Quatre des cinq premiers déterminants de capacité adaptative sont les mêmes pour les deux groupes d'agriculteurs (agriculteurs ayant 47 ans et plus et ceux ayant 46 ans ou moins),

toutefois leur ordre de priorité est différent (Figures 48 et 49). Pour les agriculteurs de 47 ans et plus, les conditions de marché représentaient le principal déterminant de leur capacité adaptative, tandis que pour ceux ayant 46 ans ou moins, le principal déterminant de leur capacité adaptative était les conditions climatiques. Les valeurs moyennes du ratio de cohérence étaient évaluées à 0,47 pour les agriculteurs de 47 ans et plus et à 0,28 pour ceux de 46 ans ou moins.

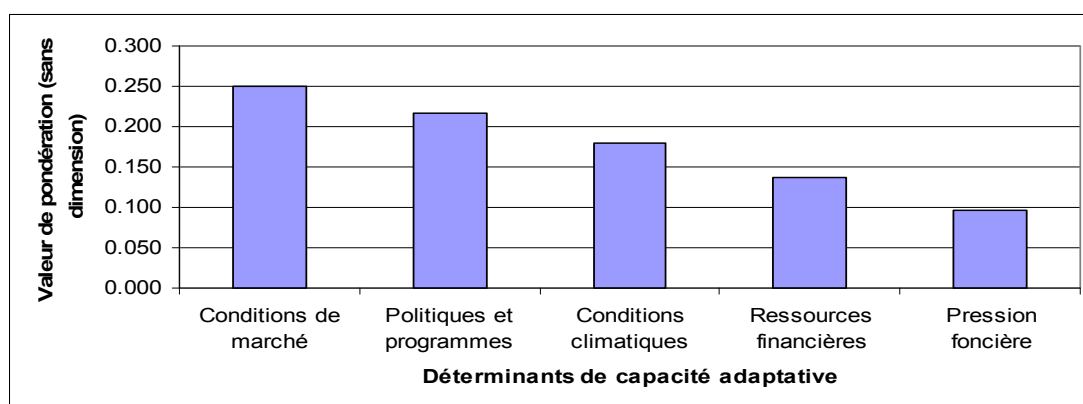


Figure 48. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien pour les agriculteurs de 47 ans et plus au cours de la période référence, 1985-2005

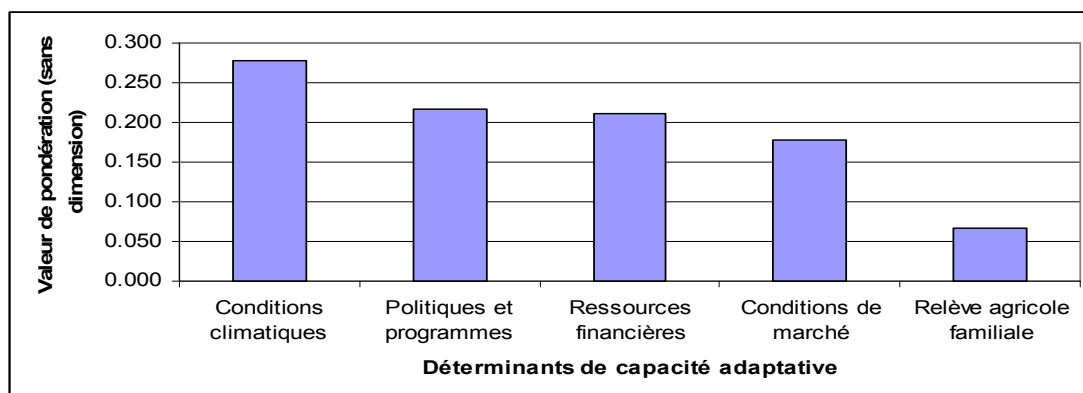


Figure 49. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Saint-Sébastien pour les agriculteurs de 46 ans ou moins au cours de la période de référence, 1985-2005

L'âge moyen des agriculteurs de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan était de 45 ans. À l'échelle de celle-ci, les agriculteurs de 45 ans et plus accordaient une plus grande priorité à la relève agricole familiale. Ceux ayant 44 ans ou moins considéraient que les conditions

climatiques étaient le principal déterminant de leur capacité adaptative (Figures 50 et 51). Les deux groupes d'agriculteurs considéraient les politiques et les programmes ainsi que la qualité de la recherche agricole parmi les cinq premiers déterminants de capacité adaptative. Les valeurs moyennes du ratio de cohérence étaient estimées à 0,48 pour les agriculteurs de 45 ans et plus et à 0,43 pour ceux ayant 44 ans ou moins.

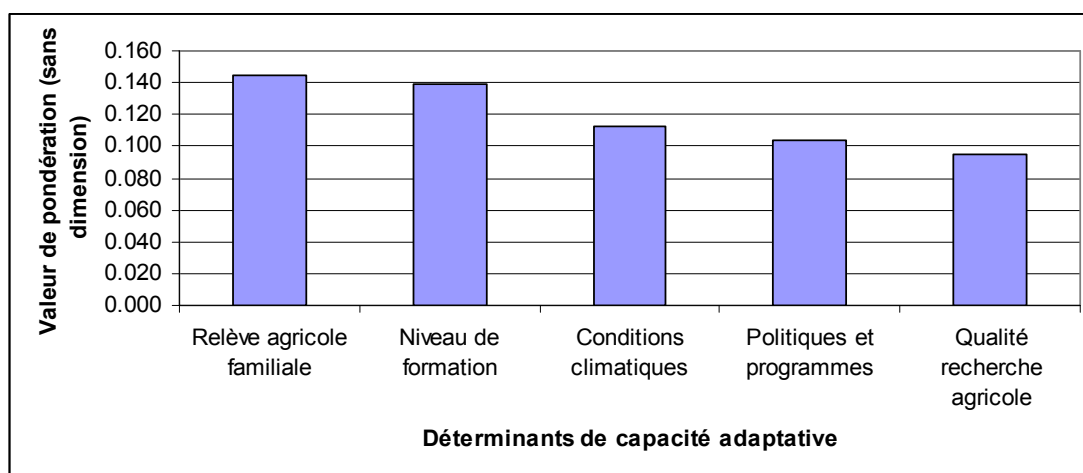


Figure 50. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour les agriculteurs de 45 ans et plus au cours de la période de référence, 1985-2005

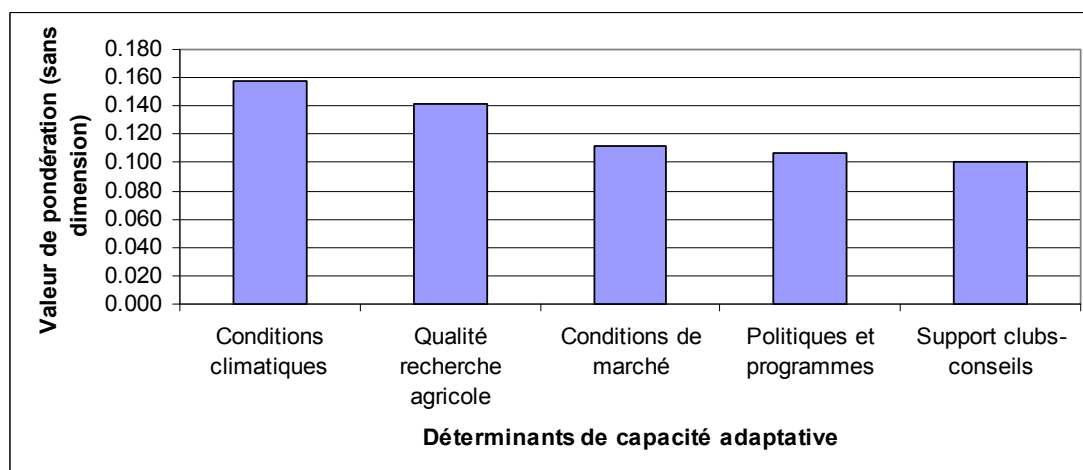


Figure 51. Principaux déterminants de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain et leur valeur de pondération à Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pour les agriculteurs de 44 ans ou moins au cours de la période de référence, 1985-2005

Calculés selon les étapes décrites au niveau de la méthodologie, les indicateurs de capacité adaptative (ICA) pour les régions agricoles de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est sont, pour la période de référence (1985-2005), évalués à 0,08 et 0,05, respectivement. Les facteurs relatifs à la qualité de la recherche agricole, les conditions climatiques adverses et le niveau de formation des producteurs agricoles dans une moindre mesure ont grandement influencé le niveau de capacité adaptative relativement faible des fermes productrices de maïs-grain de la région de Lac-St-Jean-Est aux variabilités et changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression. À l'intérieur de la région agricole de Montérégie-Ouest, la valeur des indicateurs de capacité adaptative était similaire pour les deux municipalités, soit 0,08. Pour ces deux municipalités, les facteurs ayant le plus contribué à réduire la capacité adaptative des producteurs sont essentiellement la relève agricole familiale et les conditions climatiques.

Cette section a mis en relief le caractère spécifique des déterminants de capacité adaptative. Ce concept est très sensible aux questions d'échelle et de contexte. En effet, le type et le nombre de facteurs susceptibles d'influencer la capacité adaptative des producteurs aux variabilités et changements climatiques variaient non seulement entre les deux régions



agricoles, mais aussi à l'intérieur d'une même municipalité lorsque les agriculteurs sont regroupés selon des catégories d'âge. Ces spécificités sur les types et l'ordre de priorité des déterminants de capacité adaptative pourraient être utilisées dans un processus d'élaboration de politiques ou programmes visant le renforcement des capacités de réponse des fermes productrices de maïs-grain dans les régions à l'étude.

Cette section a permis également de constater que la région agricole du Lac-Saint-Jean-Est possède une capacité adaptative légèrement inférieure à celle de la région agricole de Montérégie-Ouest. La différence entre les indicateurs de capacité adaptative des deux régions agricoles s'expliquait en grande partie par les facteurs relatifs à la qualité de la recherche agricole et les conditions climatiques adverses.

Certains déterminants de capacité adaptative aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression identifiées au niveau de cette étude correspondent à ceux mentionnés par d'autres recherches. Belliveau et al. (2006), en adoptant une démarche méthodologique quasi similaire à celle suivie dans la présente étude, ont identifié deux principaux facteurs susceptibles de favoriser l'adaptation de l'industrie vinicole aux changements climatiques. Ces deux facteurs correspondaient à la disponibilité des ressources et à l'accès aux programmes gouvernementaux. Formulés d'une autre façon, ces facteurs équivalent aux déterminants touchant les ressources financières et politiques et programmes dans la présente étude. Parmi les six indicateurs d'adaptabilité des producteurs agricoles de la région de Montréal identifiés par André et Bryant (2001), trois d'entre eux étaient similaires à ceux mentionnés dans cette étude. Il s'agit des indicateurs relatifs aux ressources financières, au niveau de formation de l'exploitant agricole et aux conditions biophysiques de l'exploitation, notamment les conditions climatiques. Toutefois, le processus d'allocation des poids aux déterminants de capacité adaptative de l'étude d'André et Bryant (2001) diffère de la nôtre. Vincent (2006) a développé deux indicateurs de capacité adaptative à deux niveaux :

régional (entre les pays africains) et ménages (entre les ménages d'un village de l'Afrique du Sud). Indépendamment de l'échelle considérée, l'étude de Vincent (2006) a identifié l'accès aux ressources comme l'un des déterminants de capacité aux changements climatiques. La principale différence de notre étude avec celle de Vincent (2006) se situe au niveau du choix des principaux déterminants de capacité adaptative. L'étude de Vincent (2006) s'est essentiellement basée sur des données empiriques lors du choix des potentiels déterminants de capacité adaptative; ce qui complique un peu la comparaison des valeurs d'indicateur de capacité adaptative. D'après le Rapport de la commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (2008), la relève agricole constitue un élément fondamental dans le processus d'adaptation de fermes agricoles au Québec, ce qui rejoint la place accordée à ce facteur parmi les principaux déterminants de capacité adaptative identifiés au cours de notre étude. Deressa et al. (2009) ont trouvé que certains agriculteurs du bassin du Nil en Éthiopie ne s'adaptaient pas aux changements climatiques par manque d'information, de moyens financiers, de terre arable, de main-d'œuvre agricole et du faible potentiel pour l'irrigation. Une fois de plus, bien que le contexte de production des agriculteurs éthiopiens soit différent de ceux des trois municipalités à l'étude, certains déterminants identifiés dans l'étude de Deressa et al. (2009) sont similaires à ceux trouvés dans la présente étude.

Par contre, Tschaket (2006), à l'aide d'une approche participative d'allocation de priorité incluant les petits agriculteurs du centre de Sénégal, a identifié que le statut sanitaire, le taux de chômage et la qualité des infrastructures représentaient les principaux facteurs ou déterminants de capacité adaptative. L'étude de Tschaket (2006) réalisée dans un contexte très différent du contexte québécois a permis de mettre en relief l'importance du contexte dans le choix et la priorisation des déterminants de capacité adaptative aux changements climatiques (Westerhoff et Smit, 2009).

En effet, les comparaisons effectuées entre les déterminants identifiés au niveau de cette étude et ceux obtenus dans d'autres travaux de recherche ont permis de faire les constats suivants :

- La méthodologie (approche « top-down » versus « bottom-up ») influence dans une large mesure le type de déterminants ainsi que la priorité accordée aux différents déterminants de capacité adaptative. Avec la méthode basée sur les données empiriques (généralement réalisée à l'aide de l'approche « top-down »), les populations ou les acteurs du secteur concerné contribuent peu au processus de choix et d'allocation de priorité aux différents déterminants de capacité adaptative.
- Il est toujours important de préciser l'échelle spatiale sur laquelle on travaille, car les déterminants et les priorités sont variables d'une échelle à l'autre.
- L'accès aux ressources est l'un des facteurs les plus cités lorsqu'on parle de déterminants de capacité adaptative aux changements climatiques.
- Avec une approche ascendante (bottom-up), il est plus facile d'identifier les déterminants de capacité adaptative pertinents pour les acteurs du secteur concerné et par conséquent de mieux orienter les stratégies d'amélioration ou d'augmentation de leur capacité de réponse.

## **7.5 Scénarios d'indicateurs de capacité adaptative et de CV des superficies en maïs-grain au cours de la période future 2010-2039**

Les principaux déterminants de capacité adaptative des producteurs agricoles de la Montérégie-Ouest (indépendamment de la municipalité considérée) étaient dans l'ordre d'importance décroissante : 1) les conditions de marché, 2) les ressources financières, 3) les politiques et programmes, 4) les conditions climatiques et 5) la relève agricole familiale. Pour la région du Lac-Saint-Jean-Est (municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan), les

déterminants de capacité adaptative étaient plutôt, selon un ordre de priorité décroissante, les suivants : 1) les conditions climatiques, 2) la relève agricole familiale, 3) la qualité de la recherche agricole, 4) le niveau de formation des producteurs, et 5) les politiques et programmes. Les indicateurs de capacité adaptative étaient de 0,08 pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien de la région agricole de Montérégie-Ouest et de 0,05 pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan de la région du Lac-St-Jean-Est.

Tel que mentionné au niveau de la méthodologie, les lignes directrices ou familles d'émissions de GES A2 et A1B du rapport spécial sur les scénarios d'émissions ont été considérées dans l'élaboration des scénarios d'indicateurs de capacité adaptative et de CV des superficies en maïs-grain pour la période future 2010-2039. La croissance démographique, le développement socio-économique et l'évolution technologique étaient les différentes forces motrices ou les principaux vecteurs de changement considérés dans la définition des lignes directrices ou familles d'émissions. Pour la famille d'émission de GES A2, les hypothèses suivantes ont été considérées pour les trois vecteurs de changement (Nakicenovic et al., 2000) :

- Croissance démographique : accroissement continu de la population mondiale.
- Développement socio-économique : développement économique avec une orientation principalement régionale, mais plus lente et plus fragmentée que dans les autres familles d'émission.
- Évolution technologique : évolution plus lente et plus fragmentée que dans les autres familles d'émission.

Différentes à plusieurs égards de celles considérées pour la famille d'émission A2, les hypothèses retenues pour la famille d'émission de GES A1B sont les suivantes :

- Croissance démographique : croissance de la population mondiale à un maximum vers le milieu du siècle suivi d'une diminution.

- Développement socio-économique : croissance économique très rapide, orientée vers une globalisation plus prononcée de l'économie mondiale.
- Évolution technologique : introduction de technologies plus efficaces et un équilibre entre les différentes sources d'énergie.

Pour les trois municipalités préalablement mentionnées, à l'exception des conditions climatiques, tous les autres déterminants principaux identifiés au cours du processus d'analyse multicritère sont susceptibles d'être influencés par les vecteurs de changement considérés dans la définition des familles d'émission de GES, notamment A2 et A1B. Les conditions climatiques ont été exclues pour le simple fait qu'aucune des familles d'émission n'a considéré d'initiatives climatiques supplémentaires. Le tableau 31 indique les nouvelles valeurs de pondération considérées dans le calcul des indicateurs de capacité adaptative pour les producteurs des municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien. Tel qu'indiqué au niveau de la méthodologie, ces nouvelles valeurs de pondération ont été basées sur une appréciation personnelle de la situation des cinq déterminants selon les scénarios socio-économiques considérés au cours de la période future (2010-2039) pour les trois municipalités. Comme on peut le constater au niveau du tableau 31, pour le scénario A1B caractérisé, entre autres, par un accroissement de l'éventail des options économiques, les nouvelles pondérations indiquent des situations essentiellement moins favorables pour les quatre déterminants principaux par rapport aux situations de référence et également par rapport au scénario A2.

Tableau 31. Pondération des déterminants de capacité adaptative future des fermes productrices de maïs-grain dans les deux municipalités de la Montérégie-Ouest (Sainte-Martine et Saint-Sébastien)

| <b>Déterminants principaux de capacité adaptative</b> | <b>Nouvelles valeurs de pondération</b> |            |
|---|---|------------|
|   | <b>A2</b>                               | <b>A1B</b> |
| Conditions de marché                                  | 1                                       | 1/3        |
| Politiques et programmes                              | 1                                       | 1/3        |
| Relève agricole familiale                             | 1/2                                     | 1/3        |
| Ressources financières                                | 1                                       | 1/2        |

Pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, à un degré moindre, le même constat peut être fait entre les pondérations pour les scénarios A1B et A2 (Tableau 32). En effet, les pondérations pour le scénario d'émission A1B (Relève agricole familiale), laissent croire des situations moins favorables aux déterminants principaux de capacité adaptative.

Tableau 32. Pondération des déterminants de capacité adaptative future des fermes productrices de maïs-grain au Lac-St-Jean-Est (Lac-à-la-Croix/Métabetchouan)

| <b>Déterminants principaux de capacité adaptative</b> | <b>Nouvelles valeurs de pondération</b> |            |
|---|---|------------|
|   | <b>A2</b>                               | <b>A1B</b> |
| Relève agricole familiale                             | 1/2                                     | 1/3        |
| Qualité de la recherche agricole                      | 1                                       | 1          |
| Politiques et programmes                              | 1                                       | 1          |
| Niveau de formation des agriculteurs                  | 1                                       | 1          |

La prise en compte des nouvelles valeurs de pondération a permis d'élaborer les six scénarios d'indicateurs de capacité adaptative (à raison de 2 scénarios par municipalité)

présentés dans le tableau 33. Celui-ci révèle un indicateur de capacité adaptative plus élevé sous le scénario A2 pour les trois municipalités. Sous le scénario A1B, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan posséderait une capacité adaptative légèrement plus élevée que les deux municipalités de la Montérégie-Ouest.

Tableau 33. Indicateurs de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain dans les trois municipalités à l'étude au cours de la période future (2010-2039)

| <b>Municipalités</b>         | <b>ICA</b> |            |
|------------------------------|------------|------------|
|                              | <b>A2</b>  | <b>A1B</b> |
| Sainte-Martine               | 0,14       | 0,06       |
| Saint-Sébastien              | 0,13       | 0,06       |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 0,08       | 0,07       |

Les CV de superficies en maïs-grain étaient, pour la période de référence, estimés à 0,74 pour la municipalité de Sainte-Martine, 0,62 pour Saint-Sébastien et 0,48 pour Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Comme pour les indicateurs de capacité adaptative, les scénarios de CV des superficies de maïs-grain ont été élaborés en tenant compte des deux familles de scénarios d'émission de GES, en l'occurrence A2 et A1B. L'identification des scénarios de CV des superficies en maïs-grain a toutefois été plus directe que celle des indicateurs de capacité adaptative. En effet, en considérant les deux familles de scénario d'émission, l'hypothèse suivante a été considérée dans l'élaboration des scénarios de CV des superficies en maïs-grain : L'orientation essentiellement économique des deux familles de scénarios

d'émission impliquerait une plus grande variabilité des superficies en maïs-grain. Cependant, cette augmentation de la variabilité de ces superficies serait plus importante pour le scénario A1B orienté vers la globalisation de l'économie. Ainsi, afin d'obtenir les scénarios de CV des superficies en maïs-grain, les valeurs de CV des superficies pour la période de référence ont été augmentées de 1,5 pour A2 et de 2 pour A1B. Le choix des valeurs d'ajustement arbitrairement effectué était tout simplement guidé par le souci d'augmenter la variabilité ou la sensibilité de ce paramètre sous des conditions futures orientées vers le développement économique. Les scénarios de CV de superficies en maïs-grain pour la période future sont présentés au tableau 34. Ces nouveaux scénarios de CV des superficies en maïs-grain indiquent que les deux municipalités de la Montérégie-Ouest seraient toujours plus sensibles aux facteurs socio-économiques que celle du Lac-St-Jean-Est.

Tableau 34. CV des superficies en maïs-grain pour les trois municipalités à l'étude au cours de la période future (2010-2039)

| Scénarios<br>d'émission | Coefficient de variabilité des superficies en maïs-grain |                 |                              |
|-------------------------|--|-----------------|------------------------------|
|                         | Municipalités  |                 |                              |
|                         | Sainte-Martine   | Saint-Sébastien | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |
| A2                      | 1,11   | 0,93            | 0,72                         |
| A1B                     | 1,48   | 1,24            | 0,96                         |

La capacité adaptative des trois municipalités au cours de la période 2010-2039 varierait selon la famille de scénarios d'émission considérée. En effet, si l'on considère le scénario A2, les trois municipalités possèderaient, au cours de la période 2010-2039, une capacité adaptative supérieure à celle estimée pour la période de référence. Pour le scénario A2, les deux municipalités de Montérégie-Ouest, en l'occurrence Sainte-Martine et Saint-



Sébastien, possèderaient une capacité adaptative supérieure à celle de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au Lac-St-Jean-Est. Lorsque le scénario d'émission A1B est considéré, les deux municipalités de la Montérégie-Ouest auraient non seulement une capacité adaptative inférieure à celle qu'elles avaient au cours de la période de référence, mais également une capacité adaptative légèrement inférieure à la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au cours de la période future. Cette situation s'expliquerait en grande partie par les conséquences néfastes qu'une société orientée vers une globalisation de l'économie aurait sur la situation des déterminants principaux de capacité adaptative (majoritairement représentés par les éléments de capital financier) pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien.

En ce qui concerne les scénarios de CV des superficies en maïs-grain, quelque soit la famille de scénarios d'émission considérée, les trois municipalités connaîtraient une plus grande variabilité de leurs superficies en maïs-grain. Dit d'une autre façon, selon les scénarios élaborés, les trois municipalités seraient plus sensibles aux conditions socio-économiques qu'elles ne l'étaient durant la période de référence. La variabilité des superficies en maïs-grain pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien serait plus élevée que celle de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au cours de la période future. Ce scénario d'augmentation de la variabilité des superficies en maïs-grain s'expliquerait en grande partie par la diversité d'options qui existeraient dans un monde un peu plus orienté vers l'économie et également par les échanges et le niveau de compétitivité.

Il est certain que d'autres scénarios d'indicateurs de capacité adaptative des fermes productrices de maïs-grain dans les deux régions étudiées pourraient être construits. Parmi les autres scénarios envisageables, il serait néanmoins inapproprié de considérer le scénario statu quo, car les conditions socio-économiques futures telles que définies dans les grandes familles d'émission de GES A2 et A1B sont appelées à changer. Par conséquent, afin de simplifier le

processus d'évaluation de la vulnérabilité future du secteur, le nombre de scénarios a été délibérément fixé à deux pour chacune des trois municipalités examinées.

Par ailleurs, la pertinence des scénarios d'indicateurs de capacité adaptative pourrait être rehaussée s'ils étaient issus d'un processus participatif impliquant les différents acteurs du secteur et particulièrement les experts qui travaillent sur la question. Ceci ne serait pas pour autant une garantie en termes de leur précision et de leur validité. Étant des scénarios orientés vers le futur, il est tout à fait impossible de les valider. Ce qui nous amène à conclure que l'analyse de ces scénarios devrait être effectuée de préférence selon les logiques de base considérées.

## **7.6 Vulnérabilité pour la période future 2010-2039**

Un cultivar a été calibré pour chacune des trois municipalités analysées au cours de la période future. Ce processus était indispensable à l'utilisation du modèle de culture dans les conditions de production agricole au Québec. Le tableau 35 présente, pour les trois municipalités, les valeurs des principaux coefficients génétiques des cultivars calibrés et validés. Les cultivars calibrés et validés issus de ceux qui étaient disponibles dans DSSAT n'ont pas un nom commercialement reconnu. Pour les besoins de la thèse, ils portent le nom des municipalités dont les conditions biophysiques et les données de rendement ont été utilisées dans les processus de calibration et de validation. Les deux cultivars utilisés en Montérégie-Ouest, compte tenu du nombre d'UTM plus élevés au cours de la saison de croissance, avaient évidemment des cycles végétatifs plus longs que celui pratiqué par les producteurs agricoles de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Cette situation se reflétait au niveau des valeurs des coefficients P1 et P5. Si la valeur de P1 pour le cultivar utilisé à Saint-Sébastien était supérieure à celle de P1 pour le cultivar semé à Sainte-Martine, ce n'était toutefois pas le cas pour P5.

Tableau 35. Coefficients génétiques des cultivars calibrés et validés pour la période de référence (1985-2005) dans les trois municipalités à l'étude

| Municipalités                | Coefficients génétiques |                         |            |                         |               |               |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|---------------|---------------|
|                              | P1<br>(DJ)              | P2<br>sans<br>dimension | P5<br>(DJ) | G2<br>sans<br>dimension | G3<br>mg/jour | PHINT<br>(DJ) |
| Sainte-Martine               | 130                     | 0,5                     | 735        | 835                     | 11,5          | 55,0          |
| Saint-Sébastien              | 182                     | 0,5                     | 650        | 750                     | 8,7           | 55,0          |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 110                     | 0,3                     | 580        | 420                     | 7,5           | 38,90         |

Les résultats du processus de validation des cultivars calibrés sont indiqués au tableau 36. Le modèle CERES-Maize a fonctionné de façon assez satisfaisante dans les trois municipalités réparties dans les régions agricoles de Montérégie-Ouest et du Lac-St-Jean-Est. En effet, pour les trois municipalités considérées, les valeurs d'EF et d sont supérieures à 0 et celles de RD se trouvent dans l'intervalle acceptable de  $\pm 15\%$ . De façon générale, les paramètres statistiques présentés au tableau 36 indiquent que le modèle arrivait à reproduire assez bien les rendements observés.

Tableau 36. Résultats du processus de validation des cultivars de maïs-grain au cours de la période de référence (1985-2005) pour les trois municipalités à l'étude

| <b>Municipalités</b>         | <b>EF</b> | <b>d</b> | <b>RD</b> |
|------------------------------|-----------|----------|-----------|
| Sainte-Martine               | 0,23      | 0,54     | 7,57      |
| Saint-Sébastien              | 0,19      | 0,58     | 9,00      |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 0,44      | 0,53     | -7,04     |

Les écarts entre les rendements observés et simulés indiqués par les valeurs des paramètres statistiques ci-dessus peuvent être expliqués par plusieurs facteurs. Ceux-ci sont résumés à l'aide des points suivants :

- 1) La structure du modèle pour certains processus biophysiques : L'influence du phénomène de gel sur le niveau de rendement des cultures ne semble pas être bien intégrée dans le modèle CERES-Maize. Pour certaines années, on n'a pas constaté une influence importante de l'occurrence de gels mortels sur les niveaux de rendements. En effet, lors de l'occurrence de ceux-ci, le modèle CERES-Maize répond tout simplement par un ralentissement de certaines étapes phénologiques, notamment la durée de la phase de remplissage des grains. Ce qui se traduit généralement par des niveaux de rendements supérieurs à ceux des années avec des conditions climatiques propices à la culture du maïs-grain. Une redéfinition de certains critères ou paramètres relatifs à l'influence du phénomène de gel sur le rendement de la culture du maïs-grain est nécessaire afin de bien prendre en compte l'impact de ce phénomène.

- 2) La qualité des données d'entrée : Les données sur les dates de semis et le rayonnement solaire possèdent probablement<sup>20</sup> une certaine marge d'erreur qui influence le niveau de rendement simulé par les modèles. Certaines dates de semis estimées à partir de la température moyenne de l'air et des précipitations ont été trop hâtives pour certaines années et ne correspondaient pas toujours aux réalités de terrain. Cette remarque a été faite par les producteurs des deux régions agricoles lors de la tenue des groupes de discussions, le 26 novembre et le 3 décembre 2008 au niveau des municipalités de Saint-Jean-sur-Richelieu (pour la Montérégie-Ouest) et d'Alma (pour le Lac-St-Jean-Est), respectivement. L'intégration de critères supplémentaires qui prennent en compte les conditions d'humidité des sols et les possibilités de les travailler favoriserait une meilleure estimation des dates de semis. Il est clair qu'un producteur aurait beaucoup plus de difficultés à travailler un sol gorgé d'eau. Par ailleurs, la considération des mêmes cultivars pour les simulations sur différentes années n'est pas conforme aux réalités. En effet, la durée de vie d'un cultivar est limitée à quelques années (3 à 5 ans; cette information a été collectée lors des échanges avec les producteurs agricoles) et ces changements de cultivar sont susceptibles d'avoir des impacts sur le niveau de rendement.
- 3) Les effets secondaires : Les simulations ne prenaient pas en compte l'influence de l'occurrence des maladies, d'insectes ravageurs et de la présence de mauvaises herbes. Comme les simulations effectuées considéraient que le seul facteur limitant était l'eau, il était quasiment impossible de reproduire, à l'aide du modèle CERES-Maize, les rendements influencés par les autres facteurs qui déterminent le rendement agricole.
- 4) Les erreurs au niveau des rendements observés : En ce qui concerne les rendements observés, il peut exister une certaine marge d'erreur issue des méthodologies utilisées.

---

<sup>20</sup> Faute de données sur les dates des semis et de données observées de rayonnement solaire, il n'a pas été possible d'apprécier le niveau d'incertitude des données estimées pour ces deux paramètres.

En d'autres termes, la précision des statistiques sur les rendements n'est pas toujours assurée, elle dépend grandement de l'approche méthodologique adoptée pour la collecte des données. Les données de rendement fournies par La Financière agricole du Québec n'ont pas toujours été obtenues à partir de mesures des rendements. Dans certains cas, ces statistiques proviennent tout simplement des rendements déclarés par les producteurs agricoles.

- 5) Le processus de calibration : Les cultivars retenus ont été calibrés uniquement à partir de données de rendement. Pour le processus de calibration, bien qu'on ait commencé par calibrer les paramètres déterminants le développement de la culture, le fait qu'on ne disposait pas de données quantitatives précises sur les stades de développement de la culture introduisaient un biais supplémentaire dans ce processus. La calibration de ces stades était basée sur les informations qualitatives (en termes de périodes approximatives d'observation des stades considérés par le modèle de culture) collectées auprès des producteurs agricoles des deux régions agricoles.

Les trois cultivars calibrés (dont les coefficients génétiques ont été présentés au tableau 35) ont été utilisés dans l'évaluation du potentiel de rendement ainsi que dans celle du rendement limité par l'eau. Les rendements obtenus pour ces deux types de simulation ont été utilisés dans l'appréciation des impacts des changements climatiques selon les étapes décrites dans la méthodologie.

Le changement relatif des potentiels de rendements est présenté pour chacune des trois municipalités (Tableau 37). En considérant le cultivar de référence, le potentiel de rendement du maïs-grain diminuerait pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien et ceci, peu importe les scénarios climatiques et de concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> considérés. Cette tendance à une baisse du potentiel de rendement est surtout marquée pour le scénario chaud et sec du modèle MIROC3.2 (medres). Celui-ci a été estimé à -12,2 % avec

considération de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> (432ppm) et à -13,7 % sans considération de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. La considération d'un cultivar amélioré ou plus performant a permis d'avoir des changements relatifs positifs pour le potentiel de rendements du maïs-grain pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien. Ce cultivar plus tardif favoriserait un étirement ou un allongement de certains stades phénologiques du maïs-grain, notamment la phase de remplissage des grains. Par contre, pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, en considérant le cultivar de référence, aucune baisse du potentiel de rendement du maïs-grain n'est prévue au cours de la période 2010-2039. Ceci s'explique essentiellement par une diminution de l'occurrence de gels mortels et des conditions de températures élevées plus propices à la croissance et au développement de la culture. Contrairement aux deux municipalités de la Montérégie-Ouest, des changements relatifs positifs ont été plus élevés avec le scénario climatique chaud et sec de MIROC3.2 (medres) pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Avec un cultivar plus performant, il a été possible d'augmenter un peu plus le potentiel de rendement du maïs-grain pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Les résultats obtenus ont clairement mis en évidence l'influence de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sur la culture du maïs-grain pour tous les scénarios climatiques. Cet effet a été positif pour tous les scénarios climatiques et quelque soit le cultivar considéré. L'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> a été plus marqué pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan avec le cultivar futur.

Tableau 37. Changement relatif (en %) des potentiels de rendements du maïs-grain pour les trois municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine        |                      |                      |                      | Saint-Sébastien       |                      |                      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence        |                      | Cultivar futur       |                      |
|                        | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039         | -0,9                  | -2,6                 | 54,2                 | 51,7                 | -6,0                  | -7,5                 | 79,0                 | 76,0                 | 74,0                         | 55,0                 | 272,3                | 231,6                |
| MRCCdelta              | -3,6                  | -5,2                 | 51,2                 | 48,7                 | -10,8                 | -12,2                | 69,8                 | 67,0                 | 68,6                         | 57,9                 | 279,7                | 246,2                |
| ECHAM5 (FH)            | -0,6                  | -2,3                 | 54,8                 | 52,2                 | -5,8                  | -7,4                 | 73,8                 | 72,5                 | 120,1                        | 105,0                | 436,4                | 391,0                |
| MIROC3.2 (medres) (CS) | -5,6                  | -7,1                 | 49,6                 | 47,1                 | -12,2                 | -13,7                | 70,1                 | 67,2                 | 112,8                        | 97,7                 | 481,7                | 430,5                |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | -4,5                  | -11,2                | 52,3                 | 49,8                 | -9,4                  | -10,9                | 70,0                 | 68,8                 | 119,0                        | 103,0                | 439,9                | 329,7                |

Comme pour le potentiel de rendement, les résultats des impacts des changements climatiques sur les rendements agricoles limités par l'eau sont également présentés pour les trois municipalités. La direction des impacts des changements climatiques sur les rendements limités par l'eau était similaire à celle sur le potentiel de rendement. Tel qu'indiqué au tableau 38, avec le cultivar de référence et sans considération de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, les changements de rendement seraient négatifs pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien. Par contre, pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, le changement relatif des rendements limités par l'eau du maïs-grain serait positif avec le cultivar de référence et quelque soit le scénario climatique et la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> considérés. La tendance à la baisse des rendements du maïs-grain au cours de la période 2010-2039 est un peu marquée au niveau de la municipalité de Saint-Sébastien où elle avoisine les -18 %. La plus forte baisse de rendement obtenue avec le cultivar de référence et sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub> a été avec le scénario climatique chaud et sec du modèle MIROC3.2 (medres). En considérant l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> avec le cultivar de référence,



les rendements du maïs-grain varient d'une région à l'autre. Pour la municipalité de Saint-Sébastien, ces rendements sont à la baisse pour tous les scénarios climatiques. L'intervalle de changement négatif pour cette municipalité est estimé entre -9,3 % et -14,6 %. Pour la municipalité de Sainte-Martine, à l'exception des résultats obtenus avec le scénario chaud et sec du modèle MIROC3.2 (medres), le changement relatif du rendement du maïs-grain est positif avec toutefois des valeurs très faibles ne dépassant pas les 5%. Pour Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les rendements avec le cultivar de référence et effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sont à la hausse pour tous les scénarios climatiques. Toutefois, le plus fort taux de changement positif, estimé à 120,1 % a été obtenu avec le scénario frais et humide du modèle ECHAM5. Généralement, une température minimale élevée est préjudiciable au bon développement la plante. Des températures maximales plus élevées favoriseraient, entre autres, un raccourcissement de la durée de la phase de remplissage des grains qui se traduit en principe par une baisse de rendements. Avec l'adoption de cultivars améliorés ou plus performants, les résultats ont montré qu'il est possible d'augmenter les rendements au niveau de toutes les trois municipalités. Toutefois, il est important de préciser que le risque de dommages dus au gel hâtif serait beaucoup plus élevé avec les cultivars plus performants qu'avec les cultivars de référence. À titre d'exemple, en considérant le scénario climatique MRCC, la fréquence de gel hâtif au cours de la période future serait en moyenne de 1 fois tous les 6 ans pour les municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien et de 1 fois tous les 3 ans pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Par ailleurs, il est également important de signaler que les changements relatifs positifs très élevés des rendements avec le cultivar futur pour les différentes municipalités, notamment Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, sont principalement dus aux limitations du modèle en ce qui a trait à l'intégration du phénomène de gels mortels.

Tableau 38. Changement relatif (en %) des rendements limités par l'eau pour le maïs-grain dans les trois municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine        |                      |                      |                      | Saint-Sébastien       |                      |                      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence        |                      | Cultivar futur       |                      |
|                        | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039         | 1,8                   | -10,4                | 52,3                 | 33,6                 | -9,3                  | -14,1                | 64,3                 | 50,7                 | 44,8                         | 42,9                 | 259,8                | 253,2                |
| MRCCdelta              | 2,8                   | -5,3                 | 59,8                 | 44,0                 | -13,1                 | -15,7                | 62,4                 | 53,7                 | 39,1                         | 37,3                 | 245,9                | 239,8                |
| ECHAM5 (FH)            | 4,6                   | -3,8                 | 60,9                 | 44,7                 | -13,1                 | -11,7                | 64,2                 | 53,1                 | 46,9                         | 44,9                 | 290,5                | 283,8                |
| MIROC3,2 (medres) (CS) | -1,3                  | -9,9                 | 52,9                 | 36,1                 | -14,6                 | -17,9                | 60,6                 | 48,6                 | 47,5                         | 45,4                 | 355,1                | 346,6                |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | 0,2                   | -8,4                 | 56,6                 | 39,2                 | -11,0                 | -14,8                | 63,3                 | 52,1                 | 46,4                         | 44,0                 | 291,7                | 283,6                |

Les impacts des changements climatiques sur les rendements, notamment les rendements limités par l'eau, traduisaient les impacts des changements climatiques sur différentes phases phénologiques critiques de la culture du maïs-grain. Pour mieux expliquer les changements appréhendés, une analyse détaillée des impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques clés a été effectuée. Pour chacune des municipalités, deux tableaux (un pour chaque scénario de cultivar) relatifs aux impacts des changements climatiques sur cinq stades phénologiques sont présentés.

Les tableaux 39 et 40 indiquent les impacts anticipés des changements climatiques sur certaines phases phénologiques du maïs-grain pour la municipalité de Sainte-Martine. Mis à part la phase « Fin de la phase juvénile à initiation florale » pour le cultivar de référence, les impacts des changements climatiques sur les autres stades phénologiques avec ou sans effet fertilisant CO<sub>2</sub> sont similaires. Avec le cultivar de référence et avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, la durée de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » aurait tendance à diminuer. En effet, pour le cultivar de référence et selon le scénario

climatique considéré, cette diminution varierait entre 19 jours et 24 jours. Pour le cultivar futur, le raccourcissement de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » serait compris entre 14 jours et 20 jours. Ainsi avec un cultivar plus performant, la longueur de cette phase peut être augmentée, ce qui favoriserait un ralentissement du processus de maturation de la plante.

Tableau 39. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Sainte-Martine<sup>21</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-2039              | 2   | 0  | 0   | -1   | -20   | 2   | 0  | 0   | -1   | -20   |
| MRCCdelta                   | 1   | 0  | 0   | -1   | -22   | 1   | 0  | 0   | -1   | -22   |
| ECHAM5<br>(FH)              | 1   | 0  | -1  | -2   | -19   | 1   | 0  | -1  | -2   | -20   |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | 1   | 0  | -1  | -1   | -24   | 1   | 7  | -1  | -1   | -24   |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | 1   | 0  | -1  | -1   | -23   | 1   | 0  | -1  | -1   | -23   |

<sup>21</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

Tableau 40. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Sainte-Martine<sup>22</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-2039              | 8   | -1   | -3  | -1   | -14   | 8   | -1   | -3  | -1   | -14   |
| MRCCdelta                   | 6   | -1   | -3  | -1   | -16   | 6   | -1   | -3  | -1   | -16   |
| ECHAM5<br>(FH)              | 6   | -1   | -4  | -1   | -14   | 6   | -1   | -4  | -1   | -14   |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | 6   | -1   | -3  | -1   | -20   | 6   | -1   | -3  | -1   | -20   |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | 6   | -1   | -3  | -2   | -18   | 6   | -1   | -3  | -2   | -18   |

Les tableaux 41 et 42 présentent, pour la municipalité de Saint-Sébastien, les résultats des impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques. Pour chaque catégorie de cultivar et avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, les impacts des changements

<sup>22</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

climatiques pour une même phase phénologique étaient similaires. Pour la municipalité de Saint-Sébastien, un raccourcissement de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » serait également possible. Celui-ci serait entre 18 jours et 23 jours pour le cultivar de référence et entre 10 jours et 15 jours pour le cultivar futur. Pour les deux cultivars et avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, le plus long raccourcissement serait obtenu avec le scénario chaud et sec, MIROC3.2 (medres). Il est important de signaler que pour le cultivar futur identique pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest, le raccourcissement de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » serait plus important au niveau de la municipalité de Sainte-Martine comparativement à celui de Saint-Sébastien.

Tableau 41. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Saint-Sébastien<sup>23</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-2039              | 1   | 0  | -1  | -2   | -18   | 1   | 0  | -1  | -2   | -18   |
| MRCCdelta                   | 2   | 0  | -1  | -2   | -21   | 2   | 0  | -1  | -2   | -21   |
| ECHAM5<br>(FH)              | 2   | 0  | -2  | -3   | -19   | 2   | 0  | -2  | -3   | -19   |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | 2   | 0  | -2  | -2   | -23   | 2   | 0  | -2  | -2   | -23   |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | 2   | 0  | -2  | -3   | -22   | 2   | 0  | -2  | -3   | -22   |

<sup>23</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

Tableau 42. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Saint-Sébastien<sup>24</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-<br>2039          | 1   | -1   | -7  | -2   | -10   | 1   | -1   | -7  | -2   | -10   |
| MRCCdelta                   | 2   | -1   | -7  | -2   | -12   | 2   | -1   | -6  | -2   | -12   |
| ECHAM5<br>(FH)              | 2   | -1   | -8  | -3   | -10   | 2   | -1   | -8  | -3   | -10   |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | 2   | -1   | -7  | -3   | -15   | 2   | -1   | -7  | -3   | -15   |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | 3   | -1   | -7  | -3   | -13   | 3   | -1   | -7  | -3   | -13   |

Pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les impacts des changements climatiques sur les différents stades phénologiques sont présentés aux tableaux 43 et 44 pour les cultivars de référence et futur, respectivement. Comme pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest, pour chaque catégorie de cultivar et avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>,

<sup>24</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

les impacts des changements climatiques pour une même phase phénologique étaient similaires. Toutefois, pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les impacts des changements climatiques sur la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » seraient différents de ceux anticipés pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest. En effet, pour Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, indépendamment du groupe de cultivar et des scénarios climatiques considérés, aucun raccourcissement de cette phase E n'est prévu. Pour le cultivar de référence, la longueur de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » serait ou bien égale à celle enregistrée au cours de la période de référence ou bien allongée de 11 jours. Pour le cultivar futur, l'allongement de cette phase serait encore plus prononcé. Il pourrait être entre 7 jours et 23 jours selon le scénario climatique considéré. Ceci explique à certains égards la hausse des rendements anticipés pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan au cours de la période 2010-2039.



Tableau 43. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars de référence pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan<sup>25</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-2039              | -1  | 0  | -2  | -5   | 2   | -1  | 0  | -2  | -5   | 0   |
| MRCCdelta                   | 0   | 0  | -5  | -6   | 11  | 0   | 0  | -5  | -6   | 11  |
| ECHAM5<br>(FH)              | -1  | 0  | -7  | -6   | 10  | -1  | 0  | -7  | -6   | 10  |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | -1  | 0  | -5  | -8   | 0   | -1  | 0  | -5  | -8   | 0   |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | -1  | 0  | -7  | -6   | 10  | -1  | 0  | -7  | -6   | 10  |

<sup>25</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

Tableau 44. Impacts des changements climatiques sur certains stades phénologiques des cultivars améliorés pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan<sup>26</sup>

| Scénarios climatiques       | Avec CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   | Sans CO <sub>2</sub>                                    |  |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|--|---|---|--|---|--|---|
|                             | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de la<br>phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Émergence<br>à fin de la<br>phase<br>juvénile<br>(jour) | Fin de<br>la phase<br>juvénile<br>à<br>initiation<br>florale<br>(jour) | Initiation<br>florale à<br>fin de la<br>croissance<br>des<br>feuilles<br>(jour) | Fin de la<br>croissance<br>des feuilles<br>à début du<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) | Début du<br>remplissage<br>des grains à<br>fin<br>remplissage<br>des grains<br>(jour) |
| MRCC_2010-2039              | 4   | -2   | -3  | -5   | 7   | 4   | -2   | -3  | -5   | 7   |
| MRCC delta                  | 6   | -2   | -6  | -6   | 19  | 6   | -2   | -6  | -6   | 19  |
| ECHAM5<br>(FH)              | 5   | -2   | -8  | -6   | 25  | 5   | -2   | -8  | -6   | 23  |
| MIROC3.2<br>(medres) (CS)   | 5   | -2   | -7  | -8   | 19  | 5   | -2   | -7  | -8   | 19  |
| MIUB-<br>ECHO-G<br>(Médian) | 5   | -2   | -8  | -6   | 25  | 5   | -2   | -8  | -6   | 23  |

La durée de la phase « Début de remplissage des grains à fin remplissage des grains » est grandement conditionnée par les températures maximales (tempmax) et minimales (tempmin). Les tableaux 45 et 46 présentent, pour la période 2010-2039, les changements moyens de températures anticipées pour la phase de remplissage des grains. Évidemment, les

<sup>26</sup> Une valeur positive représente un allongement de la durée d'un stade phénologique tandis qu'une valeur négative équivaut à une réduction.

changements de tempmax et de tempmin sont généralement plus élevés pour le scénario chaud et sec, MIROC3.2 (medres). De façon générale, les changements de tempmax et de tempmin pendant la phase de remplissage des grains sont plus élevés avec le cultivar de référence qu’avec le cultivar futur. C’est ce qui a expliqué que les rendements anticipés en considérant le cultivar de référence étaient généralement inférieurs à ceux obtenus avec le cultivar futur. Pour avoir des rendements plus élevés avec le cultivar de référence, une alternative serait de semer un peu plus tard donnant ainsi à la plante la possibilité de commencer la période de remplissage des grains à la fin de la saison estivale, généralement plus fraîche. Cette stratégie d’adaptation pourrait se révéler très complexe lorsqu’on considère ses implications au niveau des systèmes de production possédant déjà un calendrier de réalisation des travaux bien établi dans la plupart des cas et également de la prise en compte d’autres facteurs biophysiques, notamment la longueur des cycles de croissance et également le régime de précipitation pendant la période de remplissage des grains.

Tableau 45. Impacts des changements climatiques sur les températures maximales et minimales pendant la phase de remplissage des grains en considérant les cultivars de référence pour les trois municipalités à l’étude

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine                 |                                | Saint-Sébastien                |                                | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan   |                                |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                        | $\Delta\text{Tempmax}$<br>(°C) | $\Delta\text{Tempmin}$<br>(°C) | $\Delta\text{Tempmax}$<br>(°C) | $\Delta\text{Tempmin}$<br>(°C) | $\Delta\text{Tempmax}$<br>(°C) | $\Delta\text{Tempmin}$<br>(°C) |
| MRCC_2010-2039         | 4,84                           | 4,44                           | 5,52                           | 4,94                           | 3,96                           | 3,29                           |
| MRCC delta             | 5,28                           | 4,84                           | 5,81                           | 5,45                           | 4,88                           | 3,98                           |
| ECHAM5 (FH)            | 4,67                           | 4,39                           | 5,14                           | 4,97                           | 5,86                           | 4,97                           |
| MIROC3.2 (medres) (CS) | 5,81                           | 5,50                           | 6,45                           | 6,36                           | 8,75                           | 7,40                           |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | 5,37                           | 5,04                           | 5,82                           | 5,64                           | 5,95                           | 5,06                           |

Tableau 46. Impacts des changements climatiques sur les températures maximales et minimales pendant la phase de remplissage des grains en considérant les cultivars améliorés pour les trois municipalités à l'étude

| Scénarios climatiques     | Sainte-Martine   |                  | Saint-Sébastien  |                  | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                  |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|
|                           | ΔTempmax<br>(°C) | ΔTempmin<br>(°C) | ΔTempmax<br>(°C) | ΔTempmin<br>(°C) | ΔTempmax<br>(°C)             | ΔTempmin<br>(°C) |
| MRCC_2010-2039            | 4,24             | 3,91             | 5,58             | 5,03             | 2,90                         | 2,46             |
| MRCC delta                | 4,74             | 4,38             | 5,84             | 5,56             | 3,54                         | 2,82             |
| ECHAM5 (FH)               | 4,10             | 3,84             | 5,30             | 5,1              | 4,30                         | 3,60             |
| MIROC3,2<br>(medres) (CS) | 5,44             | 5,14             | 6,48             | 6,31             | 6,67                         | 5,66             |
| MIUB-ECHO-G<br>(Médian)   | 4,91             | 4,62             | 5,99             | 5,84             | 4,29                         | 3,61             |

Les conditions climatiques anticipées pour la période 2010-2039 auraient également des impacts sur les conditions d'humidité des sols. Celles-ci ont été appréciées à l'aide d'un indicateur de stress hydrique (fourni dans les sorties de DSSAT) variant entre 0 et 1, avec 0 indiquant un stress hydrique minimum et 1 un stress hydrique maximum. Généralement, le niveau de stress hydrique pendant la phase reproductive de la plante serait plus élevé pour le cultivar futur que pour le cultivar de référence. Ceci s'explique notamment par une augmentation de l'évapotranspiration. Pour chaque groupe de cultivar, sans considération de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, le stress hydrique serait plus élevé. Les différents niveaux de stress hydrique anticipés pour chacune des trois municipalités sont présentés aux tableaux 47 et 48. Dans ces tableaux, le niveau de stress hydrique obtenu avec le scénario climatique MRCC

doit être comparé au niveau de stress hydrique simulé avec la MRCC pour la période de référence. Pour tous les autres scénarios climatiques, les niveaux de stress hydrique doivent être comparés aux niveaux moyens simulés avec les données observées au cours de la période de référence.

Tableau 47. Impacts des changements climatiques sur le stress hydrique avec les cultivars de référence pour les municipalités à l'étude au cours de la période future 2010-2039

| Scénarios climatiques     | Sainte-Martine       |                      | Saint-Sébastien      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
|                           | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039            | 0,127                | 0,205                | 0,056                | 0,105                | 0,215                        | 0,264                |
| MRCC delta                | 0,113                | 0,185                | 0,035                | 0,069                | 0,137                        | 0,175                |
| ECHAM5 (FH)               | 0,138                | 0,210                | 0,070                | 0,119                | 0,117                        | 0,150                |
| MIROC3.2 (medres)<br>(CS) | 0,110                | 0,183                | 0,053                | 0,093                | 0,139                        | 0,181                |
| MIUB-ECHO-G<br>(Médian)   | 0,128                | 0,205                | 0,062                | 0,108                | 0,121                        | 0,159                |

Moyenne période de référence pour Sainte-Martine : **observé simulé = 0,174;**

**mrcc simulé = 0,235**

Moyenne période de référence pour Saint-Sébastien : **observé simulé = 0,059 ;**

**mrcc simulé = 0,103**

Moyenne période de référence pour Lac-à-la-Croix : **observé simulé = 0,142;**

**mrcc simulé = 0,200**

Tableau 48. Impacts des changements climatiques sur le stress hydrique avec les cultivars améliorés pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques     | Sainte-Martine       |                      | Saint-Sébastien      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
|                           | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039            | 0,217                | 0,291                | 0,117                | 0,159                | 0,237                        | 0,910                |
| MRCC delta                | 0,221                | 0,284                | 0,087                | 0,121                | 0,157                        | 0,190                |
| ECHAM5 (FH)               | 0,223                | 0,274                | 0,130                | 0,182                | 0,126                        | 0,147                |
| MIROC3.2 (medres)<br>(CS) | 0,209                | 0,278                | 0,128                | 0,177                | 0,146                        | 0,183                |
| MIUB-ECHO-G<br>(Médian)   | 0,241                | 0,306                | 0,128                | 0,171                | 0,123                        | 0,147                |

Les changements climatiques anticipés provoqueraient des modifications non seulement dans les rendements moyens du maïs-grain et des stades phénologiques, mais également au niveau des variabilités des niveaux de rendements. Comparés à la période de référence, les rendements anticipés de maïs-grain pour la période 2010-2039 seraient généralement plus variables (Tableau 49). Au cours de la période de référence, le CV des rendements de maïs-grain était de 0,25 pour la municipalité de Sainte-Martine. Pour celle-ci, au cours de la période 2010-2039, il serait, à l'exception des rendements prévus pour le cultivar de référence et avec effet fertilisant du CO<sub>2</sub> et pour le cultivar futur avec les scénarios climatiques MRCCdelta et MIROC3.2 (medres) égal ou supérieur à 0,25 dans la majorité des autres cas.

Pour la municipalité de Saint-Sébastien dont le CV moyen des rendements au cours de la période de référence était de 0,21, il y aurait une tendance à une diminution des valeurs de CV des rendements du maïs-grain. Pour cette municipalité, à l'exception des CV pour le scénario climatique chaud et sec, MIROC3.2 (medres) pour le cultivar de référence sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub> et pour le cultivar futur avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, les valeurs de CV seraient généralement égales ou inférieures à celle de la période de référence.

Pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, la tendance future des variabilités de rendements du maïs-grain serait moins évidente. En effet, le CV des rendements du maïs-grain serait inférieur à celui de la période de référence pour les scénarios suivants :

- Avec le cultivar de référence et effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pour tous les scénarios climatiques
- Avec le cultivar de référence et sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pour tous les scénarios climatiques à l'exception du scénario issu du MRCC
- Avec le cultivar futur et effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pour tous les scénarios climatiques sauf pour celui du MRCC
- Avec le cultivar futur et sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pour le scénario chaud et sec issu du modèle MIROC3.2 (medres).

Tableau 49. Impacts des changements climatiques sur la variabilité des rendements (CV) du maïs-grain des municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine        |                      |                      |                      | Saint-Sébastien       |                      |                      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence        |                      | Cultivar futur       |                      |
|                        | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039         | 0,21                  | 0,25                 | 0,28                 | 0,33                 | 0,21                  | 0,24                 | 0,23                 | 0,28                 | 0,41                         | 0,49                 | 0,53                 | 0,55                 |
| MRCCdelta              | 0,18                  | 0,21                 | 0,23                 | 0,29                 | 0,18                  | 0,18                 | 0,18                 | 0,21                 | 0,31                         | 0,32                 | 0,39                 | 0,42                 |
| ECHAM5 (FH)            | 0,18                  | 0,22                 | 0,26                 | 0,33                 | 0,18                  | 0,19                 | 0,19                 | 0,22                 | 0,27                         | 0,32                 | 0,31                 | 0,36                 |
| MIROC3.2 (medres) (CS) | 0,18                  | 0,21                 | 0,24                 | 0,31                 | 0,18                  | 0,19                 | 0,18                 | 0,22                 | 0,28                         | 0,30                 | 0,31                 | 0,34                 |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | 0,18                  | 0,23                 | 0,25                 | 0,31                 | 0,17                  | 0,18                 | 0,19                 | 0,22                 | 0,26                         | 0,32                 | 0,31                 | 0,36                 |

À l'aide la formule indiquée au niveau de la méthodologie, les scénarios de vulnérabilité aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques anticipés ont été élaborés pour les trois municipalités. La présentation de ces résultats est effectuée par type de vulnérabilité et par scénario de capacité adaptative. Les tableaux 50 et 51 présentent les scénarios de vulnérabilité aux changements climatiques pour les deux scénarios de capacité adaptative. Au bas de chacun de ces tableaux sont présentés les niveaux de vulnérabilité de référence pour chacune des trois municipalités.

Pour les trois municipalités, quelque soit le scénario de capacité adaptative considérée, leurs niveaux de vulnérabilité aux changements et variabilités climatiques au cours de la période future seraient plus élevés que ce ceux de la période de référence. Cela s'explique essentiellement par un niveau de variabilité des rendements plus important au cours de la période future.



Tableau 50. Indicateurs de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A2 pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine        |                      |                      |                      | Saint-Sébastien       |                      |                      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence        |                      | Cultivar futur       |                      |
|                        | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039         | 1,50                  | 1,79                 | 2,00                 | 2,36                 | 1,62                  | 1,85                 | 1,77                 | 2,15                 | 5,13                         | 6,13                 | 6,63                 | 6,88                 |
| MRCCdelta              | 1,29                  | 1,50                 | 1,64                 | 2,07                 | 1,38                  | 1,38                 | 1,38                 | 1,62                 | 3,88                         | 4,00                 | 4,88                 | 5,25                 |
| ECHAM5 (FH)            | 1,29                  | 1,57                 | 1,86                 | 2,36                 | 1,38                  | 1,46                 | 1,46                 | 1,69                 | 3,38                         | 4,00                 | 3,88                 | 4,50                 |
| MIROC3.2 (medres) (CS) | 1,29                  | 1,50                 | 1,71                 | 2,21                 | 1,38                  | 1,46                 | 1,38                 | 1,69                 | 3,50                         | 3,75                 | 3,88                 | 4,25                 |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | 1,29                  | 1,64                 | 1,79                 | 2,21                 | 1,31                  | 1,38                 | 1,46                 | 1,69                 | 3,25                         | 4,00                 | 3,88                 | 4,50                 |

Vulnérabilité de Sainte-Martine aux conditions climatiques : 0,25

Vulnérabilité de Saint-Sébastien aux conditions climatiques : 0,21

Vulnérabilité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan aux conditions climatiques : 0,35

Tableau 51. Indicateurs de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A1B pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Scénarios climatiques  | Sainte-Martine        |                      |                      |                      | Saint-Sébastien       |                      |                      |                      | Lac-à-la-Croix/Métabetchouan |                      |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      | Cultivar de référence        |                      | Cultivar futur       |                      |
|                        | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub>         | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| MRCC_2010-2039         | 3,50                  | 4,17                 | 4,67                 | 5,50                 | 3,50                  | 4,00                 | 3,83                 | 4,67                 | 5,86                         | 7,00                 | 7,57                 | 7,86                 |
| MRCCdelta              | 3,00                  | 3,50                 | 3,83                 | 4,83                 | 3,00                  | 3,00                 | 3,00                 | 3,50                 | 4,43                         | 4,57                 | 5,57                 | 6,00                 |
| ECHAM5 (FH)            | 3,00                  | 3,67                 | 4,33                 | 5,50                 | 3,00                  | 3,17                 | 3,17                 | 3,67                 | 3,86                         | 4,57                 | 4,43                 | 5,14                 |
| MIROC3.2 (medres) (CS) | 3,00                  | 3,50                 | 4,00                 | 5,17                 | 3,00                  | 3,17                 | 3,00                 | 3,67                 | 4,00                         | 4,29                 | 4,43                 | 4,86                 |
| MIUB-ECHO-G (Médian)   | 3,00                  | 3,83                 | 4,17                 | 5,17                 | 2,83                  | 3,00                 | 3,17                 | 3,67                 | 3,71                         | 4,57                 | 4,43                 | 5,14                 |

Vulnérabilité de Sainte-Martine aux conditions climatiques : 0,25

Vulnérabilité de Saint-Sébastien aux conditions climatiques : 0,21

Vulnérabilité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan aux conditions climatiques : 0,35

La moyenne des niveaux de vulnérabilité pour les deux scénarios de capacité adaptative et pour les différents scénarios climatiques et types de cultivar pour chacune des trois municipalités est présentée aux tableaux 52 et 53. Les niveaux de vulnérabilité moyens, présentés au 51 pour le scénario de capacité adaptative issu des vecteurs de changements de la famille d'émissions A2, indiquent que les deux municipalités de la Montérégie-Ouest auraient un niveau de vulnérabilité moins élevé aux changements et variabilités climatiques que celle de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Entre les deux municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest, à l'exception du scénario avec le cultivar de référence et effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, la municipalité de Saint-Sébastien aurait un niveau de vulnérabilité moins élevé aux changements climatiques que la municipalité de Sainte-Martine. En considérant les niveaux moyens de vulnérabilité aux changements climatiques anticipés pour le scénario de capacité adaptative résultant des vecteurs de changements de la famille d'émission A1B, les deux

municipalités de Montérégie-Ouest auraient toujours des niveaux de vulnérabilité moyens inférieurs à ceux de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan (Tableau 53). Entre les deux municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest, les niveaux moyens de vulnérabilité de Saint-Sébastien seraient généralement inférieurs à ceux de Sainte-Martine. Encore une fois, les niveaux de variabilité des rendements expliqueraient cette tendance à des degrés relativement plus élevés de vulnérabilité aux changements climatiques pour la municipalité de Sainte-Martine comparativement à la municipalité de Saint-Sébastien.

Tableau 52. Indicateurs moyens de vulnérabilité aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A2 pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Municipalités                | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                              | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| Sainte-Martine               | 1,33                  | 1,60                 | 1,80                 | 2,24                 |
| Saint-Sébastien              | 1,42                  | 1,51                 | 1,49                 | 1,77                 |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 3,83                  | 4,38                 | 4,63                 | 5,08                 |

Tableau 53. Indicateurs moyens de vulnérabilité moyenne aux changements climatiques avec le scénario de capacité adaptative issu d'A1B pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Municipalités                | Cultivar de référence |                      | Cultivar futur       |                      |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                              | Avec CO <sub>2</sub>  | Sans CO <sub>2</sub> | Avec CO <sub>2</sub> | Sans CO <sub>2</sub> |
| Sainte-Martine               | 3,10                  | 3,73                 | 4,20                 | 5,23                 |
| Saint-Sébastien              | 3,07                  | 3,27                 | 3,23                 | 3,84                 |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 4,37                  | 5,00                 | 5,29                 | 5,80                 |

Les niveaux de vulnérabilité des trois municipalités aux conditions socio-économiques anticipées au cours de la période future 2010-2039 sont présentés au tableau 54. En considérant le scénario de capacité adaptative élaboré à l'aide des vecteurs de changement de la famille d'émissions A2, ce tableau indique que les deux municipalités de Montérégie-Ouest auraient une vulnérabilité aux conditions socio-économiques sensiblement moins élevée que celle de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Par contre, lorsque le scénario de capacité adaptative basé sur les vecteurs de changement de la famille d'émission A1B est considéré, le niveau de vulnérabilité des deux municipalités de la Montérégie-Ouest serait supérieur à celui de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Étant donné que les trois municipalités auraient approximativement le même degré de capacité adaptative avec les vecteurs de changement de la famille d'émission A1B, cette situation s'explique particulièrement par un niveau de variabilité des superficies en maïs-grain plus élevé pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest.

Tableau 54. Indicateurs de vulnérabilité future aux conditions socio-économiques pour les municipalités à l'étude au cours de la période 2010-2039

| Municipalités                | Indicateur de vulnérabilité avec<br>scénario de capacité adaptative avec<br>A2 | Indicateur de vulnérabilité avec<br>scénario de capacité adaptative avec<br>A1B |
|------------------------------|--|---|
| Sainte-Martine               | 7,90   | 24,60   |
| Saint-Sébastien              | 7,10   | 20,60   |
| Lac-à-la-Croix/Métabetchouan | 9,00   | 13,72   |

Vulnérabilité de Sainte-Martine aux conditions socio-économiques : 0,74

Vulnérabilité de Saint-Sébastien aux conditions socio-économiques : 0,62

Vulnérabilité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan aux conditions socio-économiques : 0,48

Cette section (7.6) a permis d'apprécier l'influence éventuelle des changements climatiques et des conditions socio-économiques sur les niveaux de vulnérabilité des municipalités de Sainte-Martine, Saint-Sébastien et Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. En effet, les niveaux de vulnérabilité de ces municipalités au cours de la période future 2010-2039 varieraient selon les scénarios climatiques, les scénarios de capacité adaptative, le type de cultivar considéré et la prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Par rapport aux changements et variabilités climatiques, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan aurait généralement un niveau de vulnérabilité plus élevé que les deux municipalités de la Montérégie-Ouest. Par contre, face aux conditions socio-économiques, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan serait plus vulnérable lorsque le scénario de capacité adaptative élaboré à partir des vecteurs de changement de la famille d'émission A2 est considéré.

## **7.7 Discussion**

Pour les raisons évoquées précédemment, au cours de la période future, seule une comparaison des résultats obtenus pour la composante « sensibilité » des rendements du maïs-grain a été effectuée avec ceux d'autres études. Entre autres, cette comparaison met un accent particulier sur les facteurs pouvant expliquer les différences ou les similarités entre les résultats de la présente étude et ceux d'autres recherches réalisées ailleurs dans le monde et au Canada.

En considérant le cultivar de référence, les résultats obtenus pour la sensibilité des rendements du maïs-grain aux variabilités et changements climatiques, caractérisés à la fois par une tendance à une légère baisse, et à une faible augmentation, sont similaires à la majorité de ceux obtenus dans d'autres études. En considérant la période 2040-2069, Brassard

et Singh (2008) ont estimé, pour différentes régions agricoles du Québec, des changements relatifs dans les rendements du maïs-grain entre -1,7 % et 19,1 % avec effet fertilisant du CO<sub>2</sub> et entre -20,5 % et 4,9 % sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Si les résultats obtenus par Brassard et Singh (2008) sont, à certains égards (particulièrement en ce qui concerne l'influence de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sur les rendements), similaires à ceux de cette étude, il reste néanmoins vrai qu'il en existe des différences importantes en termes de méthodologie. Ces différences concernent l'horizon temporel retenu, la version de DSSAT utilisé et les types de cultivars considérés. Contrairement à la présente étude qui anticipe les rendements du maïs-grain pour la période 2010-2039, celle de Brassard et Singh (2008) avait plutôt simulé les rendements pour la période 2040-2069. La considération de cette période implique également la prise en compte de scénarios climatiques différents. Par rapport à ceux-ci, l'étude de Brassard et Singh (2008) a utilisé directement les sorties des MCG qui sont considérées inappropriées pour des études d'impacts des changements climatiques à des échelles spatiales plus petites. La présente étude a utilisé une version plus récente de DSSAT dont certains processus ont été bonifiés à la suite d'une amélioration des connaissances sur certains mécanismes. La présente étude se démarque particulièrement de celle de Brassard et Singh (2008) en ce qui concerne les cultivars considérés. Au lieu d'utiliser le même cultivar pour toutes les régions du Québec, la présente étude a calibré et validé un cultivar spécifique aux conditions biophysiques des trois municipalités à l'étude et a intégré une stratégie d'adaptation caractérisée par l'adoption d'un cultivar plus performant dans le futur.

En utilisant deux scénarios climatiques élaborés à partir des familles d'émissions de GES A2 et B2, Xiong et al. (2007) ont évalué, pour trois périodes de temps (2011-2040, 2041-2060, 2061-2100) les impacts potentiels des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain irrigué et non irrigué en Chine. D'après les résultats de leurs simulations effectuées à l'aide de CERES-Maize intégré dans la version 3.5 de DSSAT, les

rendements du maïs-grain seraient à la baisse dans la majorité des régions lorsque l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> n'est pas pris en compte. En considérant l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, les rendements, selon la même étude de Xiong et al. (2007), seraient à la hausse pour le maïs-grain cultivé sans irrigation tandis que les rendements seraient à la baisse pour le maïs-grain irrigué. La principale différence entre cette étude et celle de Xiong et al. (2007) se trouve au niveau des scénarios climatiques utilisés. En ce qui concerne l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sur les rendements du maïs-grain, les résultats de l'étude de Xiong et al. (2007) ne diffèrent pas de ceux trouvés dans la présente étude. Ceci peut s'expliquer par le fait que le même modèle de culture a été utilisé dans les deux cas.

Au centre du Chili, selon les scénarios climatiques considérés, les rendements du maïs-grain, simulés à l'aide de CERES-Maize intégré dans la version 4.0 de DSSAT, sont appelés à diminuer entre 10 % et 30 % d'ici 2080 (Meza et al., 2008). L'une des principales causes de cette baisse serait une augmentation du taux de développement de la plante avec comme conséquence un raccourcissement de certains stades phénologiques. Contrairement à d'autres études, celle de Meza et al. (2008) n'anticipe aucune augmentation des rendements du maïs-grain. Ceci peut être dû au fait qu'un seul scénario climatique a été utilisé. Cette approche basée sur la considération d'un scénario climatique unique n'est généralement pas recommandée, car elle ne renseigne nullement sur les incertitudes inhérentes aux scénarios de conditions climatiques futures.

Au centre-ouest des États-Unis, en utilisant le modèle CERES-Maize de DSSAT 3.5, Southworth et al. (2000) trouvaient que les rendements du maïs-grain pour la période 2050-2059, avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, seraient à la hausse pour les États situés plus au nord tandis qu'une certaine baisse est prévue pour ceux situés plus au sud de la région. Pour les États localisés plus au nord, Southworth et al. (2000) ont également constaté que l'augmentation des rendements du maïs-grain serait encore plus importante lorsque des

cultivars tardifs ont été considérés. À l'instar de la présente étude, celle de Southworth et al. (2000) a mis en relief l'impact négatif de températures élevées durant certains stades phénologiques clés.

Kapetanaki et Rozenzweig (1997) ont estimé une baisse des rendements du maïs-grain pour les régions centrales et nordiques de la Grèce. Simulées à l'aide de CERES-Maize intégré dans DSSAT 3.0 et en considérant quatre scénarios climatiques dont 3 élaborés à partir de la considération d'une concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> supérieure de deux fois à celle de 1990, ces baisses de rendements anticipés pour les différents sites, seraient principalement provoquées par une réduction de la durée de la période de croissance. Comme la présente étude, celle de Kapetanaki et Rozenzweig (1997) a démontré qu'il serait possible de tirer profit des conditions climatiques anticipées en introduisant des variétés de maïs-grain mieux adaptées aux régions centrales et nordiques de la Grèce. Pour les régions nordiques, ils ont suggéré de considérer celles pratiquées dans les régions centrales. Pour ces dernières, ils ont plutôt suggéré de développer des variétés avec une période de remplissage des grains plus longue.

El Maayar (1999), à l'aide de son propre modèle dénommé CYSS (Crop Yield Simulation System) a estimé une baisse des rendements du maïs-grain pour tout le Québec pouvant atteindre les -40 %. Selon lui, cette baisse de rendement serait attribuable à l'accélération du processus de maturation de la plante et à des problèmes de déficit hydrique. Comme on peut l'imaginer, le modèle utilisé par El Maayar (1999) explique en grande partie les différences constatées en matière de direction et de l'ampleur des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain au Québec. D'autre part, le statu quo en termes de cultivar peut être également considéré dans l'explication des baisses de rendement anticipées par le modèle CYSS.



Singh et al. (1998), en considérant un scénario climatique élaboré à partir du modèle de circulation générale du Centre Climatique Canadien, ont prévu, d'ici 2100, une augmentation des rendements du maïs-grain pouvant aller jusqu'à 20 %. Faute de données, le processus de validation du modèle de culture utilisé au niveau de l'étude de Singh et al. (1998), n'a pas été effectué pour le maïs-grain, ce qui compromet un peu la validité des résultats de rendements anticipés pour cette culture. Les résultats de leur étude représentent tout simplement des analyses de sensibilité de rendement du maïs-grain pour le cultivar utilisé. D'autre part, il est également important de signaler que l'étude de Singh et al. (1998) n'a pas pris en compte l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>,

La comparaison de nos résultats et ceux obtenus dans d'autres études pour des conditions climatiques similaires a révélé que l'ampleur et la direction des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain sont grandement influencées par les démarches méthodologiques adoptées. Celles-ci peuvent être différentes à plusieurs niveaux, notamment en termes d'horizon temporel, du modèle de culture, de concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et de ses effets, du type de cultivar et des scénarios climatiques. Toutefois, indépendamment de la méthodologie privilégiée, les rendements du maïs-grain affichent une certaine sensibilité au déficit hydrique et au raccourcissement de la phase de remplissage des grains provoqué par l'occurrence de températures plus élevées. Par ailleurs, la plupart des résultats de toutes les études effectuées sur la question révèlent l'effet bénéfique d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> sur les rendements du maïs-grain. Certaines d'entre elles sont plus nuancées à ce sujet en soulignant que cet effet bénéfique pourrait diminuer voir inexistant si d'autres facteurs comme l'eau et les éléments nutritifs sont limitants.

## **Chapitre 8. REGARD CRITIQUE SUR LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE ET LES RÉSULTATS OBTENUS**

En se basant sur les pourcentages des changements relatifs des rendements du maïs-grain limités par l'eau présentés au tableau 38, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan de la région de Lac-St-Jean-Est aurait un gradient de changement positif et supérieur aux municipalités de Sainte-Martine et de Saint-Sébastien de la région de Montérégie-Ouest. Ce taux de changement positif des rendements du maïs-grain serait d'autant plus marqué au niveau de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan lorsque le cultivar futur avec ou sans effet fertilisant du CO<sub>2</sub> est considéré. Toutefois, ce gradient de changement généralement plus élevé pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan pourrait être confronté à une plus grande fréquence d'occurrence de gels mortels. Si un producteur de cette municipalité décide, compte tenu du haut risque de perte par gels mortels, de ne pas opter pour un cultivar plus performant, il aurait encore le choix d'appliquer un cultivar avec, approximativement, les mêmes exigences biophysiques que celui pratiqué au cours de la période de référence et il ne verrait pas diminuer pour autant son niveau de rendement. Étant donné que les facteurs qui déterminent l'adoption d'un nouveau cultivar ne se limitent pas uniquement aux seuls éléments agronomiques, le producteur de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan qui déciderait d'adopter le cultivar futur réaliserait sans doute une réflexion plus poussée au niveau d'autres aspects socio-économiques aussi importants que les facteurs agronomiques dans son processus décisionnel.

Malgré des degrés de variabilité des superficies en maïs-grain supérieurs à ceux de la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, les deux municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest n'auraient pas toujours un niveau de vulnérabilité plus élevé aux conditions socio-économiques. En effet, lorsque le scénario de capacité adaptative élaboré à partir des vecteurs de changement de la famille d'émission de GES A2 est considéré, les deux

municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest auraient un niveau de vulnérabilité légèrement moins élevé que celui de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan. Contrairement à la vulnérabilité aux changements climatiques, la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan aurait un niveau de vulnérabilité aux conditions socio-économiques sensiblement égal ou inférieur aux deux municipalités de la Montérégie-Ouest. Par rapport aux indicateurs de vulnérabilité, il importe de rappeler qu'ils renseignent sur le degré de vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain de la Montérégie-Ouest par rapport à ceux du Lac-St-Jean-Est. Ils ne permettent pas, toutefois, de conclure que ces deux régions sont absolument vulnérables aux variabilités et changements climatiques. En effet, contrairement à la notion de résilience qui met l'accent sur des seuils, le concept de vulnérabilité ne possède pas de seuils spécifiques qui définissent une ou des situations de vulnérabilité.

La validité des mises au point relatives aux hypothèses formulées et, de façon générale, des résultats fondamentaux de cette étude est largement conditionnée par certains postulats considérés et certaines étapes méthodologiques suivies. Les limitations des prémisses considérées et des étapes méthodologiques suivies méritent d'être débattues afin que les différents résultats de l'étude soient bien interprétés et utilisés.

Le concept de vulnérabilité, à la fois complexe et inclusif, a été uniquement apprécié à l'aide de deux variables principales, en l'occurrence, les rendements et les superficies en maïs-grain. En se basant exclusivement sur ces deux variables, notre approche d'évaluation du concept est relativement réductrice (Schneider 2007; Sharma et Patwardhan, 2008). En plus, le choix de ces deux variables pourrait être biaisé du fait que les agriculteurs des régions agricoles concernées n'ont pas participé au processus de sélection des paramètres caractérisant leur niveau de vulnérabilité. Idéalement, on devrait s'efforcer d'avoir une idée sur la façon dont le concept de vulnérabilité est compris par les producteurs agricoles, autrement dit quand se considèrent-ils vulnérables, notamment aux conditions climatiques

dans un contexte de multiples sources de pression. Cette étape n'a pu être effectuée non pas par faute de temps, mais parce que notre principal souci était d'avoir accès à une série temporelle satisfaisante pour les variables devant être utilisées dans l'appréciation de la vulnérabilité des deux régions agricoles aux variabilités et changements climatiques dans une situation de multiples sources de pression. Par ailleurs, l'influence de changements technologiques n'a pas été explicitement isolée avant l'analyse des impacts des changements climatiques sur les rendements du maïs-grain (Reidsma, 2007; Ewert et al, 2005).

Comme indiqué au niveau de la méthodologie, les données de rendement et de superficies en maïs-grain étaient principalement collectées dans le cadre du programme d'assurances de la Financière agricole du Québec. Ce programme offrait une série temporelle pour ces données à l'échelle de nos besoins d'analyses, c'est-à-dire à l'échelle des municipalités. Les données de rendements pouvaient permettre d'avoir une idée plus juste sur les niveaux de rendements généralement obtenus dans les deux régions agricoles. Toutefois, il était possible de n'avoir pas eu une appréciation complète des superficies en maïs-grain à partir de cette source de données si la participation des producteurs au programme d'assurances de la Financière agricole du Québec n'était pas générale. Pour la région de Lac-St-Jean-Est, la longueur des séries de données de rendements et de superficies en maïs-grain était relativement courte, ce qui a eu une certaine influence sur les valeurs des coefficients de variation de ces paramètres. Une série de données plus longue pour cette municipalité, comme c'était le cas pour les deux municipalités de la Montérégie-Ouest, fournirait une meilleure idée du niveau de variation des rendements et des superficies en maïs-grain.

En ce qui concerne la période future, la principale limitation est le fait que les scénarios de capacité adaptative et de variabilité des superficies en maïs-grain ont été élaborés uniquement à partir des vecteurs de changement des deux familles d'émission de GES, A2 et A1B. Celles-ci sont toutes les deux orientées vers un monde dominé par les activités

économiques. Le fait d'élaborer de cette façon les différents scénarios préalablement mentionnés n'a pas permis de se faire une idée sur la gamme de cas plausibles en termes de vulnérabilités aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques au cours de la période future 2010-2039. Un souci de cohérence entre les scénarios utilisés dans les scénarios climatiques et les lignes directrices utilisées dans l'élaboration des différents scénarios de capacité adaptative et de CV des superficies en maïs-grain a guidé le choix de cette façon de faire. En effet, il semblait incorrect de considérer les lignes directrices ou les vecteurs de changement des autres familles d'émissions, notamment B1 et B2, alors que les scénarios climatiques utilisés étaient spécifiquement construits pour les scénarios A2 et A1B.

Contrairement à la période de référence, les différents indicateurs de capacité adaptative pour la période future étaient directement ou explicitement considérés dans l'évaluation des niveaux de vulnérabilité aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques. La considération explicite des différents scénarios de capacité adaptative a produit des gradients de changement relativement élevé au niveau de la vulnérabilité aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques. Ces changements de niveau de vulnérabilité ne devraient pas être interprétés sous l'angle de valeur absolue des gradients de changements, mais plutôt en termes de tendance générale. En ce qui a trait aux rendements simulés pour la période future et qui ont servi à l'évaluation des niveaux de vulnérabilité aux changements et variabilités climatiques, un seul scénario d'adaptation a été considéré. Il s'agit de l'adoption d'un cultivar plus performant que celui pratiqué au cours de la période de référence. D'autres scénarios d'adaptation, comme la modification des dates de semis, la densité de plantation, les meilleures pratiques de conservation des sols et de l'eau, l'irrigation pour ne citer que ceux-là, pourraient être envisagés. Toutefois, on s'est limité à l'adoption d'un cultivar plus performant en vue de ne pas créer ce que les Anglo-saxons appellent le « scenario fatigue » (Alcamo, 2001). Les rendements simulés pour la période future supposent

des conditions biophysiques uniquement limitées par l'eau. Par conséquent, dans le cas où les autres paramètres déterminant le niveau de rendement ne se retrouveraient pas à leurs conditions optimales, les rendements de maïs-grain anticipés pour la période future au niveau des trois municipalités se verraient automatiquement réduits. D'où l'importance de ne pas considérer les changements de rendements prévus comme des valeurs absolues, mais comme des tendances générales susceptibles d'être modifiés si les différents postulats retenus au cours des simulations ne correspondent pas aux réalités ou conditions de production. Les différentes limitations ci-haut mentionnées, loin d'invalider les principaux résultats de l'étude, fournissent plutôt un cadre d'interprétation facilitant, entre autres, sa considération dans un processus décisionnel quelconque.

## CONCLUSION

La présente étude visait principalement à dresser un portrait de l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est. Plus spécifiquement, elle cherchait, d'une part, à évaluer la vulnérabilité actuelle et future du secteur susmentionné aux changements climatiques dans un contexte où il y a de multiples sources de pression et, d'autre part, à réaliser une analyse comparative inter ou intra-régionale des degrés de vulnérabilité de ce secteur au cours des deux périodes retenues (1985-2005 et 2010-2039). Par rapport à ces objectifs, les deux hypothèses suivantes constituaient le fil conducteur de l'étude :

1) dans un contexte de changements climatiques caractérisés principalement par une hausse des températures, les municipalités de la région agricole du Lac-Saint-Jean-Est, situées plus au nord et par conséquent plus éloignées du seuil maximum de la tolérance thermique du maïs-grain, connaîtront des gradients de changements de rendements positifs et supérieurs à ceux de la région agricole de Montérégie-Ouest, et

2) les municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest, indépendamment du scénario de capacité adaptative considéré, seront plus vulnérables aux conditions socio-économiques que celles de la région de Lac-Saint-Jean-Est.

Pour atteindre les objectifs susmentionnés et statuer sur les questions de recherche formulées, une approche méthodologique originale d'évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain a été conçue. À des échelles géographiques relativement petites, la démarche méthodologique employée comportait en particulier :

- l'évaluation à la fois ex post et ex ante des degrés de vulnérabilité des exploitations agricoles productrices de maïs-grain aux changements climatiques combinés aux conditions socio-économiques,

- la considération, lors des simulations des rendements du maïs-grain, d'une approche différente de celle de l'« agriculteur réfractaire aux changements », et
- le développement d'indicateurs de capacité de réponse des producteurs agricoles à l'aide d'une méthode ascendante associée à l'utilisation du PAH pour le choix des déterminants de la capacité de réponse des producteurs agricoles.

Cette nouvelle approche méthodologique d'estimation de la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques dans un contexte d'autres sources de pressions socio-économiques a été appliquée à certaines municipalités des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est.

En ce qui concerne les impacts des changements climatiques sur les niveaux de rendements du maïs-grain au cours de la période 2010-2039 pour les deux régions agricoles analysées, cette étude, contrairement aux précédentes, a révélé une tendance plus marquée aux changements positifs des rendements. Si les maladies, les ravageurs, les mauvaises herbes et le niveau de fertilité des sols sont bien contrôlés et gérés, les rendements du maïs-grain devraient augmenter dans ces deux régions agricoles au cours de la période future 2010-2039.

Ces changements positifs de rendement anticipés s'expliqueraient principalement par des régimes de température plus favorables à la culture du maïs-grain. Pour les deux municipalités de la région agricole de Montérégie-Ouest, des cultivars plus performants que ceux pratiqués actuellement entraîneraient des rendements supérieurs à ceux obtenus sous les conditions actuelles. Pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan, même avec le cultivar actuel, il serait possible de maintenir les rendements à un niveau égal ou supérieur aux rendements actuels. Par ailleurs, en adoptant un cultivar plus performant, les rendements du maïs-grain pour la municipalité de Lac-à-la-Croix/Métabetchouan seraient de loin supérieurs à ceux obtenus avec le cultivar de référence.



Avec une approche différente de celle de l'« agriculteur réfractaire aux changements » généralement considérée dans les travaux précédents au Québec sur les impacts des changements climatiques sur les rendements agricoles et le choix des cultures, cette étude a révélé que le niveau des rendements du maïs-grain, avec des cultivars plus adaptés, ne devrait pas diminuer au cours de la période future 2010-2039. Toutefois, elle a permis de constater qu'il pourrait y avoir, au cours de la période 2010-2039, une augmentation du niveau de variabilité des rendements du maïs-grain et également un risque de dommages par gel mortel plus élevé avec le choix d'un cultivar plus performant. L'adoption de ces cultivars plus performants serait influencée, entre autres, par le comportement des producteurs agricoles par rapport au risque. Parmi d'autres défis biophysiques auxquels les producteurs de maïs-grain des deux régions agricoles auraient à faire face au cours de la période future, ce travail de recherche, comme beaucoup d'autres, a aussi identifié les aspects relatifs à un déficit hydrique et à une hausse des températures minimales et maximales pendant les stades de développement critiques de la plante, notamment la période de remplissage des grains. Cette information sur les modifications éventuelles des températures minimales et maximales pourrait être utilisée dans les recherches sur la mise au point de cultivars avec des stades de croissance mieux adaptés.

En matière de déterminants de capacité adaptative, cette étude a permis de déceler certains facteurs rarement cités comme des éléments qui peuvent influencer le processus d'adaptation des producteurs agricoles aux variabilités et changements climatiques. Pour les producteurs des deux régions agricoles, des facteurs relatifs à la relève agricole, la relève institutionnelle, la qualité de la recherche agricole, le niveau de formation de l'exploitant et les politiques et programmes sont aussi importants que l'accès aux ressources, les conditions de marché et les conditions climatiques dans leur processus de prise de décision à la ferme. Parmi ces déterminants de capacité adaptative, la qualité de la recherche agricole, notamment

la vulgarisation de la recherche au moment opportun, était perçue par les producteurs du Lac-Saint-Jean-Est comme un facteur de blocage dans le processus d'adaptation aux changements climatiques.

De plus, cette étude a permis de constater que la différence entre le type et l'importance relative des déterminants de capacité adaptative n'est pas seulement entre les deux régions agricoles, mais aussi entre les municipalités d'une même région et entre les catégories d'agriculteurs à l'intérieur d'une même municipalité. Ces résultats ont fait ressortir la question de l'échelle spatiale dans l'identification des déterminants de capacité adaptative et par conséquent dans l'évaluation du niveau de vulnérabilité. De ce fait, il est inapproprié de se baser sur des déterminants de capacité adaptative à l'échelle régionale ou nationale dans l'élaboration de stratégies d'adaptations aux changements climatiques à l'échelle locale.

Le caractère dynamique du concept de vulnérabilité a été également mis en exergue et démontré au moyen de l'élaboration d'indicateurs de vulnérabilité sur deux périodes de temps et dans deux régions géographiques différentes. En considérant plusieurs scénarios de rendements et de capacité adaptative, les degrés de vulnérabilité des municipalités retenues pour les deux régions agricoles connaîtraient une certaine évolution. Malgré un niveau de capacité adaptative généralement plus grand au cours de la période future, la vulnérabilité des municipalités des deux régions agricoles aux changements climatiques et aux conditions socio-économiques serait, avec une variabilité plus prononcée au niveau des rendements, plus élevée au cours de la période 2010-2039. Ces résultats confirment que la vulnérabilité du secteur agricole est à la fois influencée par les facteurs sociaux, politiques, économiques, technologiques et environnementaux interdépendants. De ce fait, toute élaboration éclairée de stratégies d'adaptation aux changements climatiques devrait être effectuée en tenant également compte de l'existence de ces autres sources de pression.

L'application de cette nouvelle approche méthodologique au secteur des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est a permis l'atteinte des objectifs fixés pour cette étude. La vulnérabilité du secteur aux changements climatiques combinés à d'autres sources de pressions a été évaluée et une analyse comparative inter et intra régionale a été aussi réalisée. Par ailleurs, l'approche méthodologique utilisée a aussi permis de répondre aux deux principales questions de recherche. En effet, sur le plan des impacts des changements climatiques sur la productivité du maïs-grain, les résultats ont confirmé l'hypothèse selon laquelle les gradients de modification des rendements pour le Lac-Saint-Jean-Est seront positifs et supérieurs à ceux de la région de la Montérégie-Ouest. Toutefois, en ce qui a trait au degré de vulnérabilité des deux régions aux conditions socio-économiques, aucune tendance nette n'a été dégagée. Leur degré de vulnérabilité relative dépendait du scénario de capacité adaptative examiné.

Il y a eu des efforts d'évaluer de façon séparée les composantes du concept de vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques, en l'occurrence les conditions climatiques futures, les impacts de celles-ci sur les rendements agricoles et les facteurs ou les indicateurs d'adaptabilité des producteurs agricoles. Toutefois, les études qui portent sur l'évaluation proprement dite de la vulnérabilité ex post et ex ante du secteur agricole aux changements climatiques dans un contexte d'autres sources de pressions socio-économiques n'ont jamais été réalisées au Canada de façon générale et au Québec en particulier. Ce travail de recherche a comblé ce vide en développant, pour deux régions agricoles au Québec et pour deux périodes de temps différentes, des indicateurs de vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression.

L'élaboration de ces indicateurs de vulnérabilité a été effectuée en adoptant une approche méthodologique, relativement simple et particulière, centrée sur la considération

d'indicateurs de capacité adaptative et de paramètres caractéristiques (rendements et superficie) du degré de vulnérabilité du secteur des fermes productrices de maïs-grain.

L'originalité de cette démarche peut être résumée à l'aide des points suivants :

1. Évaluation à des échelles relativement petites de la vulnérabilité ex post et ex ante du secteur des fermes productrices de maïs-grain aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression,
2. Prise en compte d'une approche différente de celle de l'« agriculteur réfractaire aux changements » lors des simulations de rendements du maïs-grain,
3. Développement de plusieurs scénarios d'indicateurs de capacité adaptative des producteurs agricoles, et
4. Utilisation du PAH, une technique d'analyse multicritère, dans l'identification des déterminants de capacité adaptative des producteurs agricoles.

Moyennant la disponibilité d'un minimum de données biophysiques et socio-économiques, la méthodologie à laquelle on a eu recours dans l'évaluation de la vulnérabilité du secteur des fermes productrices de maïs-grain des régions de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est peut être facilement appliquée à d'autres contextes agricoles. Toutefois, afin d'améliorer la pertinence des résultats du processus d'appréciation des degrés de vulnérabilité et sur la base des limitations mentionnées dans la section « discussion », les modifications suivantes méritent d'être considérées :

- Intégrer les producteurs agricoles dès l'étape relative au choix des variables à considérer comme indicateurs de vulnérabilité,
- Développer un plus grand nombre de scénarios de capacité adaptative afin d'avoir une gamme plus vaste et plus diversifiée de situations plausibles,

- Favoriser la participation des différents acteurs agricoles dans toutes les étapes d'élaboration des scénarios de capacité adaptative,
- Effectuer des corrections dans les séries temporelles de rendements afin de ne considérer que les impacts réels des paramètres climatiques (températures, précipitations) qu'on souhaite étudier,
- Arriver à déterminer des dates de semis en tenant compte non seulement des facteurs de température et de précipitations, mais aussi des possibilités de travailler le sol,
- Adapter le processus de calibration du modèle de culture afin que l'aspect relatif à la durée de vie des cultivars soit pris en compte,
- Revoir le modèle CERES-Maize afin que les paramètres relatifs à l'influence de l'occurrence des gels sur les rendements reflètent les conditions de production au Québec,
- Considérer d'autres scénarios d'adaptations pour les pratiques culturales (modifications des dates de semis, irrigation, travail réduit du sol, modes de semis) et évaluer leur acceptabilité pour les producteurs agricoles, et
- Considérer de façon explicite les impacts des événements extrêmes sur le niveau de rendements.

Pour une appréciation plus juste et plus complète des degrés de vulnérabilité du secteur agricole aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression, il est fortement recommandé d'intégrer les aspects susmentionnés dans les nouveaux projets de recherche sur la question. Toutefois, compte tenu de la nature complexe de l'évaluation de la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques, il faudra toujours réaliser un compromis entre les types de données accessibles et la portée de l'évaluation qu'on souhaite

effectuer. Par ailleurs, les efforts d'évaluation de la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques dans un contexte de multiples sources de pression devraient être utilisés en priorité dans des processus de décisions qui visent à renforcer la capacité de réponse des producteurs agricoles concernés et non pas dans des débats sur les valeurs absolues des indicateurs qui en résultent.

## BIBLIOGRAPHIE

Abildtrup, J., E. Audsley, M. Fekete-Farkas, C. Giupponi, M. Gylling, P. Rosato et M. Rounsevell, 2006. Socio-economic scenario development for the assessment of climate change impacts on agricultural land use: a pairwise comparison approach. *Environmental Science and Policy*, 9: 101-115.

Adger, N. W., N. W. Arnell, et al., 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15: 77-86.

Adger, N. W., T. A. Benjaminsen et al., 2001. Advancing a political ecology of global environmental discourses. *Development and change*, 32: 681-675.

Adger, W. N., 1996. Approaches to vulnerability to climate change, center for social and economic Research on the Global Environment Working Paper GEC 96-05. University of East Anglia, Norwich, UK.

Adger, W. N., 2000. Social and ecological resilience. *Progress in Human Geography*, 24(3): 347-364.

Adger, W. N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16: 268-281.

Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2002. Le maïs de l'ouest du Canada. *Bulletin bimensuel*. Volume 15, # 13.

Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2006. L'Éthanol. *Bulletin bimensuel*, Volume 19, # 18.

Ainsworth, E. A., 2008. Rice production in a changing climate: A meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentrations, *Global Change Biology* 14: 1642-1650,

Alcamo, J., 2001. Scenarios as tools for international environmental assessments. *Environmental Issue Report*, No. 24, 31pp.

Alphonse, C.B., 1997. Application of the analytic hierarchy process in agriculture in developing countries. *Agricultural Systems*, 97-112.

Alwang, J., P. B. Siegel, et al., 2001. Vulnerability: A view from different disciplines. *Social Protection Unit, Human Development Network*, World Bank, 41pp.

André, P. et C. Bryant, 2001. Évaluation environnementale des stratégies d'investissements des producteurs agricoles de la région de Montréal en regard des changements climatiques. *Groupe de recherche sur l'adaptation aux changements environnementaux*. Rapport de recherche, 89pp.

Anothai, J., A. Patanothai, K. Pannangpetch, S. Jogloy, K.J. Boote et G. Hoogenboom, 2008. Reduction in data collection for determination of cultivar coefficients for breeding applications. *Agricultural Systems*, 96: 195-206.

Aras, H., S. Erdogmus et E. Koç, 2004. Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. *Renewable Energy*, 29: 1383-1392.

Bannayan, M., C.M. Tojo Soler, A. Garcia, L.C. Guerra et G. Hoogenboom, 2009. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on growth and development of a short-and long-season peanut cultivar. *Climatic Change*, 93: 389-406.

Bazzaz, F. A. et W. G. Sombroek, 1996. Global Climatic Change and Agricultural Production: An Assessment of current knowledge and critical Gaps. *Global Climate Change and Agricultural Production*, Rome: 319-330.

Bélanger, G. et A. Bootsma, 2001. Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec, 65<sup>ième</sup> Congrès de l'Ordre des Agronomes du Québec.

Belliveau, S., B. Smit et B. Bradshaw, 2006. Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, 16: 364-378,

Blaikie, P., T. Cannon et al., 1994. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. London: Routledge, 1st ed.

Boko, M., I. Niang, A. Nyong, C. Vogel, A. Githeko, M. Medany, B. Osman-Elasha, R. Tabo et P. Yanda, 2007: Africa, Climate change:2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikov, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge UK, 433-467.

Bootsma, A.D. et S. Gameda, 2004. Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indices in Southern Regions of Ontario and Quebec. Technical Bulletin, ECORC Contribution No, 03-284. Eastern Cereal and Oilseed Research Centre, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada.

Bootsma, A., S. Gameda, et al., 2001. Adaptation de la production agricole au changement climatique dans le Canada Atlantique. Rapport final de l'équipe du projet A214 du Fonds d'action pour le changement climatique, 32pp.

Bootsma, A. S. Gameda, et al., 2005. Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian journal of soil science*, 85(2): 345-357,

Bootsma, A., G. Tremblay et al., 1999. Analyses sur les risques associés aux unités thermiques disponibles pour la production de maïs et de soya au Québec, Bulletin technique, CRECO # de contribution 991396-F. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 27pp.

Bourgeois, G., et C. Gagnon, 2001. Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur le développement et la croissance des cultures commerciales et horticoles ainsi que sur les ravageurs associés à ces cultures, Rapport final.



- Brassard, J.-P. et B. Singh, 2008. Impacts of climate change and CO<sub>2</sub> increase on agricultural production and adaptation options for Southern Québec, Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies*, 13: 241-265.
- Brooks, N. 2003. Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper 38. University of East Anglia, Norwich, UK.
- Bryant, C. R., B. Smit et al., 2000. Adaptation in canadian agriculture to climatic variability and change. *Climatic change*, 45: 181-201.
- Burton, I., S. Huq et al., 2002. From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, 2: 145-159.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2002. Réévaluation des unités thermiques disponibles au Québec pour le maïs et le soya, 9pp.
- Deressa, T.T., R.M. Hassan, C. Ringler, T. Alemu et M. Yesuf, 2009. Determinants of farmer's choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change*, 19: 248-255.
- De Souza, A.P., M. Gaspar et al., 2008. Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, Cell and Environment*, 31: 1116-1127.
- De Wit, C.T. et F.W.T. Penning de Vries, 1982. L'Analyse des systèmes de production primaire. In *La productivité des pâturages sahéliens*. In : Penning de Vries, F.W.T. and M.A. Djiteye (Eds). Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. *Agricultural Research Reports 918*, PUDOC, Wageningen, The Netherlands, pp, 20-27.
- Downing, T.E. 1991. Vulnerability to hunger in Africa: a climate change perspective. *Global Environmental Change*, 1: 365-380.
- Drake, B.G., M.A. González et S.P. Long, 1997. More Efficient plants : a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48: 609-639,
- Dunn, K., 2000. Interviewing. *Qualitative research methods in human geography*. I. Hay. Victoria, Australia, Oxford University Press: 50-81.
- Eakin, H. et A. L. Luers, 2006. Assessing the Vulnerability of Social-Environment Systems. *Annual Review of Environment and Resources* 31: 365-394.
- Eakin, H., M. Wehbe, C. Àvila, G.S. Torres et A. Bojórquez-Tapia, 2008. Social Vulnerability of Farmers in Mexico and Argentina, 2008. In : Neil, L., C. Conde, J. Kulkarni, A. Nyong et J. Pulhim (Eds.). *Climate Change and Vulnerability*. Earthscan, London, UK, 431pp.

El Maayar, M. 1999. Modélisation et analyse des effets, directs et indirects, de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur l'agriculture au Québec. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université de Montréal, Québec.

Environnement Canada, 2007. Archives nationales d'information et de données climatologiques.

Ewert, F., M.D.A. Rounsevell, I. Reginster, M. Metzger et R. Leemans, 2005. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107: 101-116.

Fay, T.H., J.C. Greeff, B.E. Eisenberg et H.T. Groenvelde, 2006. Testing the model for one predator and two mutualistic prey species. *Ecological Modelling*, 196: 245-255.

Financière Agricole du Québec, 2005. Guide des normes reconnues par La Financière Agricole en Matière de Pratiques Culturelles. Céréales, maïs-grain, oléagineux.

Financière Agricole du Québec, 2007. Statistiques des Assurances-Récolte.

Folke, C., S.R. Carpenter et al., 2004. Regime shift, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 33: 557-581.

Füssel, H.-M. et R. J. T. Klein, 2006. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic change*, 75: 301-329.

Gallopin, G.C., 2006, Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity, *Global Environmental Change* 16: 293-303.

Gijsman, A.J., G. Hoogenboom, W.J. Parton et P.C. Kerridge, 2002. Modifying DSSAT for low-input agricultural systems, using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agronomy Journal*, 94: 462-474.

Giguère, M. 2000. Réel engouement pour le soya et le maïs-grain. *Bulletin des agriculteurs*, octobre 2000.

Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC.

Gunderson, L. H. et L. Pritchard, 2002. Resilience and the behavior of large-scale ecosystems. Island Press, Washington, D.C. USA.

Hareau, A., R. Hofstadter, et al., 1999. Vulnerability to climate change in Uruguay: potential impacts on the agricultural and coastal resources sectors and response capabilities. *Climate Research*, 12: 185-193.

Hesketh, J. et D. Baker, 1967. Light and carbon assimilation by plant communities. *Crop Science*, 7: 285-293.

Hitz, S. et J. Smith, 2004. Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, 14: 201-218.

Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4: 1-23.

Hunt, L.A. et K.J. Boote, 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. In: Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom et G. Thornton (Eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, pp, 9-39.

Hunt, L.A., S. Pararajasingham, J.W. Jones, G. Hoogenboom, D.T. Imamura et R.M. Ogoshi, 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments, *Agronomy Journal*: 85: 1090-1094.

Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), 2007. Base de données pédologiques numériques.

Institut de la Statistique du Québec (ISQ), 2008. Profil des régions et des MRC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001a. Climate change 2001: The Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report, 944p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001b. Climate change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, 1000p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Paris, France: 18pp.

Jones, C. A. et J. R. Kiniry, 1986. CERES-Maize: A simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX.

Jones, J.W., B.A. Keating et C.H. Porter, 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, 70: 421-443.

Jones, J. W., G. Hoogenbon et al., 2003. The DSSAT cropping system model. *European journal of Agronomy*, 18: 235-265.

Kapetanaki, G. et C. Rosenzweig, 1997. Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece : A simulation study with CERES-Maize. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1: 251-271.

Kelly, P. M. et W.N. Adger, 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic change*, 47: 325-352.

Kobayashi, K. et M.U. Salam, 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92: 345-352.

Laidler, G.J., J.D. Ford et al., 2009. Travelling and hunting in a changing Arctic: assessing Inuit vulnerability to sea ice change in Igloolik, Nunavut. *Climate Change*, 94: 363-397.

Lambin, E.F., M.D.A. Rounsevell et H.J. Geist, 2000. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82: 321-331.

Leakey, A.D.B., M. Uribeharrea, et al., 2006. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO<sub>2</sub> concentration in the absence of drought. *Plant Physiology*, 140: 779-790.

Leichenko, R.M. et K.L. O'Brien, 2002. The dynamics of rural vulnerability to global change: the case of southern Africa. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7: 1-18.

Leroux, M. 2005. *Global warming - Myth or Reality? The errings ways of climatology*. Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd.

Lindzen, R. S. 2007. Taking greenhouse warming seriously. *Energy and Environment* 18, #7+8: 937-950.

Liverman, D. M. 1999. Vulnerability and adaptation to drought in Mexico. *Natural Resources Journal*, 39: 99-115.

Liverman, D. M. 1990. Drought impacts in Mexico: climate, agriculture, technology, and land tenure in Sonora and Puebla. *Annals of the Association of American Geographers*, 80 (1): 49-72.

Long, S. P., E. A. Ainsworth, et al., 2006, Food for thought: Lower-than-expected crop yield simulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations, *Science*, 312: 1918-1921.

Long, S.P. 1991. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment*, 14: 729-739.

López-Cedrón, F.X., K.J. Boote, B. Ruíz-Nogueira et F. Sau, 2005. Testing CERES-Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *European Journal of Agronomy*, 23: 89-102.

Luers, A. L. 2005. The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environmental Change*, 15: 214-223.

Luers, A. L., D. B. Lobell et al., 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13: 255-267.

Luo, Q., W. Bellotti et al., 2005. Potential impacts of climate change on wheat yield in South Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 273-285.

Mall, R. K., R. Singh et al., 2006. Impact of climate change on Indian agriculture: A review. *Climatic change*, 78: 445-478.

Malone, E. et E. L. L. Rovere, 2004. Assessing Current and Changing Socio-Economic Conditions, chapter 6. In *Adaptation Policy Framework for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, UNDP.

Mavi, H.S., et G.T. Tupper, 2004. *Agrometeorology-Principles and applications of climate studies in agriculture*. Haworth Press, Inc., NY, USA, 364pp.

Mayer, D. G. et D. G. Butler, 1993. Statistical validation. *Ecological Modelling* 68: 21-32.

McLeman, R. A. 2005. *Migration as a Human Adaptation to Climate Change*. Guelph, University of Guelph. Ph.D.: 234pp.

Mearns, L. O. et M. Hulme, 2001. *Climate Scenario Development. Climate Change 2001: The scientific basis*. C. U. Press. United Kingdom and New York: 881.

Mendis, S., S. Mills et al., 2003. *Building community capacity to adapt to climate change in resource-based communities*. Prepared for the Canadian Forest Service, 84pp.

Metzger, M.J. 2005. *European vulnerability to global change, a spatially explicit and quantitative assessment*. PhD thesis, Wageningen University.

Meza, F.J., D. Silva et H. Vigil, 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, 98: 21-30.

Michaels, P.J. 2006. Is the sky really falling ? A review of recent global warming scare stories. *Policy Analysis*, 576:1-25.

Mimura, N., L. Nurse, R.F. McLean, J. Agard, L. Briguglio, P. Lefale, R. Payet et G. Sem, 2007: *Small Islands. Climate change:2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikov, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge UK, 687-716.

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 1998. *Céréales du printemps*.

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 2006a. *Profil bioalimentaire de la Montérégie*: 92p.

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 2006b. *Régions du Québec*. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/>  
Consulté le 20 mars 2007.

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 2005. *Suivi 2003 du Portrait agro-environnemental des fermes du Québec*.

Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 281 : 277-294.

Morissette, H. 1972. Les conditions du développement agricole au Québec. Québec, Canada, Les Presses de l'Université Laval.

Moss, R.H., E.L., Malone et A.L. Brenkert, 2002. Vulnerability to climate change : a quantitative approach. Prepared for the US Department of Energy, PNNL-SA-33642.

Mott, K.A. 1990. Sensing of atmospheric CO<sub>2</sub> by plants. *Plant, Cell and Environment*, 13: 731-737.

Music, B. et D. Caya, 2007. Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi river Bassin as simulated by the canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, 8: 969-988.

Nakicenovic, N., J. Alcamo et al., 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.

Neil, L., C. Conde, J. Kulkarni, A. Nyong et J. Pulhim, 2008. Climate Change and Vulnerability. Earthscan (Eds.), London, UK, 431pp.

Norman, J.M. et T.J. Arkebauer, 1991. Predicting canopy light use efficiency from leaf characteristics. In: J.T, Ritchie, J. Hanks (Eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*. Agronomy monograph, 31, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp, 125-143.

O'Brien, K., R. Leichenko et al., 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, 14: 303-313.

Okada, H., S.W. Styles et M.E. Grismer, 2008. Application of the analytic hierarchy process to irrigation project improvement. Part II. How professionals evaluate an irrigation project for its improvement. *Agricultural water management*, 95: 205-210.

Parry, M.L., 2001. Viewpoint-climate change: where should our research priorities be? *Global Environmental Change*, 11: 257-260.

Polsky, C., R. Neff et B. Yarnal, 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change* 17: 472-485.

Polsky, C. 2004. Putting space and time in Ricardian climate change impact studies: the case of agriculture in the US great plains. *Annals of the Association of American Geographers*, 94 (3): 549-564.

Polsky, C., D. Schröter et al., 2003. Assessing Vulnerabilities to the Effects of Global Change: An Eight-Step Approach. Research and Assessment Systems for Sustainability Program Discussion Paper 2003-05. Cambridge, MA: Environment and Natural Resources Program, Belfer Center for Science and International Affairs, Kennedy School of Government, Harvard University.

Poluektov, R. A. et A. G. Topaj, 2001. Crop modeling: Nostalgia about present or reminiscence about future. *Agronomy Journal*, 96: 653-659.

Pronovost, J., M. Dumais et P. Tremblay, 2008. Agriculture et agroalimentaire : assurer et bâtir l'avenir. Rapport de la Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, 272pp.

Reidsma, P. 2007. Adaptation to Climate Change: European Agriculture. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

Reilly, J. 1994. Crops and climate change. *Nature*, 367: 118-119.

Ressources Naturelles Canada, 2008. L'Éthanol, un carburant écologique d'avenir. Office de l'efficacité énergétique.

Richter, G.M. et M. A. Semenov, 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. *Agricultural Systems* 84: 77-97.

Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Godwin et W.T. Bowen, 1998. Cereal growth, development and yield. In Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom et P.K. Thornton (Eds.). *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 79-88.

Rosenzweig, C., A. Iglesias et al., 2001. Climate Change and extreme weather events: Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change and Human Health*, 2: 90-104.

Rosenzweig, C. et M. L. Parry, 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 367: 133-138.

Saaty, T.L. 1986. Axiomatic foundation of the Analytical Hierarchy Process. *Management Science*, 32 (7): 841-855.

Saaty, T.L. et P.C. Rogers, 1976. Higher education in the United States (1985-2000) : Scenario construction using a hierarchical framework with eigenvector weighting. *Socio-economic Planning Sciences*, 10: 251-263.

Saaty, T.L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15: 234-281.

Savoie, M. 2006. Étude du caractère local des impacts du changement climatique sur les rendements en agriculture au Québec. Travail de maîtrise. Département de géographie, Université de Montréal, Québec.

Schneider, S.H., W.E. Easterling et L.O. Mearns, 2000. Adaptation: Sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate changes. *Climatic Change*, 45: 203-221.

Schoemaker, P.J.H. et C.C. Waid, 1982. An experimental comparison of different approaches to determining weights in additive utility models. *Management Science*, 28.

Schröter, D., C. Polsky et A. Patt, 2005. Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10 (4): 573-595.

Sharma, U. et A. Patwardhan, 2008. Methodology for identifying vulnerability hotspots to tropical cyclone hazard in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13: 703-717.

Singh, B., M. El Maayar, et al., 1998. Impacts of a ghg-induced climate change on crop yields: effects of acceleration in maturation, moisture stress and optimal temperature. *Climatic change*, 38: 51-86.

Singh, B. et R.B. Stewart, 1991. Potential impacts of a CO<sub>2</sub>-induced climate change using the GISS scenario on agriculture in Quebec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 35: 327-347.

Smit, B., I. Burton et al., 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic change*, 45: 223-251.

Smit, B., L. Ludlow et al., 1988. Implications of a global climatic warming for agriculture: A review and appraisal. *Journal of Environmental Quality*, 17(4): 519-527.

Smit, B. et O. Pilifosova, 2003. From Adaptation to Adaptive Capacity and Vulnerability Reduction. In *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*. J. B. Smith, Klein, R.J.T. and Saleemul, H. (eds.). London, UK: 9-28.

Smith, J.B., H.S. Schneider et al., 2009. Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 4133-4137.

Southworth, J., J.C. Randolph, M. Habeck, O.C. Doering, G. Rao, R.A. Pfeifer et J Johnston, 2000. Consequences of future climate change and changing climate variability on corn yields in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82: 139-158.

Statistique Canada, 2002. Recensement de l'agriculture de 2001, Division de l'agriculture, Statistique Canada.

Statistique Canada, 2007. Recensement de l'agriculture de 2006, Division de l'agriculture, Statistique Canada.

Statistique Canada, 2008. Foin et grandes cultures, par province, par région agricole de recensement (RAR) et par division de recensement (DR), recensement 2006. [http://www.statcan.ca/francais/freepub/95F0301XIF/tables/html/Table13Can\\_f.htm#24](http://www.statcan.ca/francais/freepub/95F0301XIF/tables/html/Table13Can_f.htm#24), Consulté le 23 février 2007.

Statistique Canada, 2006. Foin et grandes cultures, par province, par région agricole de recensement (RAR) et par division de recensement (DR), recensement 2001. [http://www.statcan.ca/francais/freepub/95F0301XIF/tables/html/Table13Can\\_f.htm#24](http://www.statcan.ca/francais/freepub/95F0301XIF/tables/html/Table13Can_f.htm#24), Consulté le 19 février 2007.

Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes et E. Fereres, 2009. AquaCrop-The fAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101: 426-437,



Stockle, C.O. et J.R. Kiniry, 1990. Variability in crop radiation use efficiency associated with vapor pressure deficit. *Field Crop Research*, 25: 171-181.

Teh, C., 2006. Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer model. Brownwalker Press, Boca Raton 244 pp.

Thomson, A. M., R. A. Brown et al., 2005. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated Assessment. Part 3. Dryland production of grain and forage crops. *Climatic change*, 69: 43-65.

Thornley, J. H. M. et R. Johnson, 2000. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon Press; Oxford University Press Oxford: New York 669 pp.

Timsina, J. et E. Humphreys, 2006. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat system: A review. *Agricultural Systems*, 90: 5-31.

Tran, L.T., C.G. Knight, R.V. O'Neill et E.R. Smith, 2004. Integrated environmental assessment of the mid-Atlantic region with analytical network process. *Environmental Monitoring and Assessment*, 94: 263-277.

Tschakert, P. 2007. Views from the vulnerable: Understanding climatic and other stressors in the Sahel. *Global Environmental Change*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.11008.

Tsuji, G.Y., G. Uehara et S. Balas, (eds), 1994. DSSAT version, volumes 1, 2,3. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom et P.K. Thornton, 1998. Understanding options for agricultural production, Kluwer, Netherlands.

Turner, B. L. I., R. E Kaspersen, et al., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainable science. *Proceedings of the National Academy of Sciences US* 100, 8074-8079.

Union des Producteurs Agricoles (UPA), 2004. Rapport d'orientation sur l'établissement des jeunes en Agriculture au Québec, 43p.

Vaidya, O.S. et S. Kumar, 2006. Analytic hierarchy process : an overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169: 1-29.

Vancly, J.K. et J.P. Skovsgaard, 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling*, 98 : 1-12.

van Ittersum, M.K., P.A. Leffelaar, H. van Keulen, M.J. Kropff, L. Bastiaans et J Goudriann, 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18 : 201-234.

Vàsquez-Leòn, M., C. T. West et al., 2003. A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexico border. *Global Environmental Change* 13: 159-173.

- Villa, C.M., 1993. Calibracion de modelos para estimar la radiacion solar. Informes de invetsigacion 1990, CENIDRASPA, 5: 19-32.
- Vincent, K. 2007. Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. *Global Environmental Change*, 17: 12-24.
- Walker, B.H., M. Anderies, A.P. Kinzing et P. Ryan, 2006. Exploring resilience in social-ecological systems through comparatives studies and theory development: introduction to the special issue. *Ecology and Society*, 11(1): 12.
- Wang, Y. P., J. R Handoko, et al., 1992. Sensitivity of wheat growth to increased air temperature for different scenarios of ambient CO<sub>2</sub> concentration and rainfall in Victoria, Australia - a simulation study. *Climatic Research*, 2: 131-149.
- Westerhoff, L. et B. Smit, 2009. The rains are disappointing us: dynamic vulnerability and adaptation to multiple stressors in the Afram Plains, Ghana. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14: 317-337.
- Wilby, R.L et C.W. Dawson, 2007. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User manual, 90pp.
- Wilby, R. L. et C. W. Dawson, 2004. Using SDSM version 3.1 - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User manual, 67pp.
- Wilhelmi, O. V. et D. A. Wilhite, 2002. Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study. *Natural Hazards*, 25: 37-58.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63: 1309–1313.
- Xiong, W., R. Matthews, I. Holman, E. Lin et Y. Xu, 2007. Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change. *Climatic Change*, 85: 433-451.
- Xiong, W., I. Holman, D. Conway, E. Lin et Y. Li, 2008. A crop model cross calibration for use in regional climate change impacts studies. *Ecological Modelling*, 213: 365-380.
- Yang, H., A. Dobermann, et al., 2006. Features, applications, and limitations of the hybrid-maize simulation model. *Agronomy Journal*, 98: 737-748.
- Yang, H., A. Dobermann, et al., 2004. "Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches". *Field Crops Research* 87: 131-154.
- Yang, J., D. J. Greenwood et al., 2000. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N\_ABLE. *Agricultural Systems* 64: 37-53.
- Zelitch, I. 1973. Plant productivity and the control of photorespiration. *Proceedings of the Natural Academy of Science of the USA*, 70: 579-584.

## ANNEXES

Fiches d'enquête

Montréal-Ouest

Nom du répondant :

Municipalité :

Sexe :

Âge :

Superficies en céréales :

### Déterminants de capacité adaptative

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   | 1 |   |   |   |   |   |
| 3 |   |   | 1 |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   | 1 |   |   |   |
| 5 |   |   |   |   | 1 |   |   |
| 6 |   |   |   |   |   | 1 |   |
| 7 |   |   |   |   |   |   | 1 |

### Processus d'Adaptation et de prises de décisions

1- Comment définiriez-vous le mot 'adaptation'?

2- Aviez-vous fait ou prévoyez-vous faire une ou des adaptations?

3- Quand est-ce que vous estimez qu'il est nécessaire ou indispensable de s'adapter?

- 4- Quels sont les facteurs que vous considérez avant d'effectuer une activité d'adaptation?
- 5- Pouvez-vous nous citer en quelques points les étapes suivies avant d'effectuer une activité d'adaptation?
- 6- Évaluez-vous systématiquement les mesures d'adaptations effectuées, Si oui, comment ?
- 7- Quels sont les facteurs qui vous guident dans le choix des cultures à pratiquer sur vos fermes ?

## Échelle comparative des critères

| Jugement verbal               | Évaluation numérique |
|-------------------------------|----------------------|
| Extrêmement plus important    | 9<br>8               |
| Très fortement plus important | 7<br>6               |
| Fortement plus important      | 5<br>4               |
| Modérément plus important     | 3<br>2               |
| Importance égale              | 1                    |

## **Critères (Éléments pouvant influencer la capacité adaptative)**

- 1- Ressources financières (capital économique)
- 2- Conditions de marché (prix des intrants, taux de change, prix des produits agricoles)
- 3- Relève agricole familiale (capital humain)
- 4- Relève institutionnelle (capital humain)
- 5- Politiques et programmes (adéquation, durée, incitatifs financiers)
- 6- Conditions climatiques (extrêmes et niveau de variabilité)
- 7- Pression foncière

### Lac-St-Jean-Est

Nom du répondant :

Municipalité :

Sexe :

Âge :

Superficies en céréales :

### Déterminants de capacité adaptative

|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 1  | 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 2  |   | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 3  |   |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 4  |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 5  |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 6  |   |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |
| 7  |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |    |    |    |    |
| 8  |   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |
| 9  |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 |    |    |    |    |    |
| 10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |    |    |    |    |
| 11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    | 1  |    |    |    |
| 12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 1  |    |    |
| 13 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    |
| 14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | 1  |

### Processus d'Adaptation et de prises de décisions

1- Comment définiriez-vous le mot 'adaptation'?

2- Aviez-vous fait ou prévoyez-vous faire une ou des adaptations?

3- Quand est-ce que vous estimez qu'il est nécessaire ou indispensable de s'adapter?

4- Quels sont les facteurs que vous considérez avant d'effectuer une activité d'adaptation?

- 5- Pouvez-vous nous citer en quelques points les étapes suivies avant d'effectuer une activité d'adaptation?
- 6- Évaluez-vous systématiquement les mesures d'adaptations effectuées, Si oui, comment ?
- 7- Quels sont les facteurs qui vous guident dans le choix des cultures à pratiquer sur vos fermes ?



### Échelle comparative des critères

| <b>Jugement verbal</b>        | <b>Évaluation numérique</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Extrêmement plus important    | 9<br>8                      |
| Très fortement plus important | 7<br>6                      |
| Fortement plus important      | 5<br>4                      |
| Modérément plus important     | 3<br>2                      |
| Importance égale              | 1                           |

## **Critères (Éléments pouvant influencer la capacité adaptative)**

- 1- Ressources financières (capital économique)
- 2- Niveau de formation (capital humain)
- 3- Conditions de marché (prix des intrants, taux de change, prix des produits agricoles)
- 4- Support des clubs-conseils (capital humain/social)
- 5- Relève agricole familiale (capital humain)
- 6- Relève institutionnelle (capital humain)
- 7- Politiques et programmes (adéquation, durée, incitatifs financiers)
- 8- Qualité de la recherche agricole (cultivars spécifiques à la zone, résultats de recherche vulgarisés au moment opportun)
- 9- Conditions climatiques (extrêmes et niveau de variabilité)
- 10-Diminution de la place occupée par la production animale
- 11-Perception du phénomène des changements climatiques